



MINISTÈRE DES ARMÉES

Dossier d'environnement final de la zone de potentiel éolien en mer de « Bretagne Nord-Ouest »

Volet « Dynamique sédimentaire »

Lot 4 – référence T4.HDYN1_RAP

Auteurs : Carla Labarthe, Laurent Leballeur, MÉRIL MÉRINDOL, Elodie Marchès, Nona Favé, André Lusven.

Référence : convention Shom/DGEC n°96/2024, relative à la réalisation des études de reconnaissance environnementale de site en vue des appels d'offres pour l'implantation d'éoliennes en mer au large des côtes françaises.

Suivi des révisions

REVISIONS	DATE	COMMENTAIRE
B1	27/02/2026	1 ^{ère} version du rapport.
B2	20/04/2026	Version révisée suite à la relecture du CEREMA

Table des matières

Table des figures	5
Liste des tableaux	12
Glossaire.....	13
1. Introduction.....	14
2. Etat de la connaissance de la zone d'étude	15
2.1 Localisation	15
2.2 Bathymétrie	16
2.3 Paramètres sédimentaires	18
2.3.1 Faciès sédimentaire	18
2.3.2 Répartition des types de nature des fonds.....	20
2.3.3 Structures sédimentaires, géologiques et objets anthropiques	22
2.3.4 Epaisseur sédimentaire	24
2.4 Paramètres hydrodynamiques.....	25
2.4.1 Niveau d'eau.....	25
2.4.2 La réanalyse HYWAT : marée, surcote, courant, vague.....	25
2.4.3 Analyse des conditions hydrodynamiques aux points du maillage du modèle	25
2.4.3.1 Courant.....	25
2.4.3.2 Vague.....	27
2.5 Apports fluviaux	29
3. Analyse de la mise en mouvement des sédiments et évaluation du transport solide	29
3.1 Méthodologie	29
3.2 Définition des tailles de grains représentatives de la zone BNO	30
3.3 Calcul des seuils critiques de mise en mouvement des sédiments.....	31
3.4 Evaluation du mode de transport.....	33
3.5 Résultats	33
3.5.1 Statistiques de mise en mouvement des sédiments.....	33
3.5.1.1 Analyse du temps de mobilité des sédiments sous l'effet combiné des vagues et courants selon Soulsby (1997)	33

3.5.1.2	Analyse du temps de mobilité des sédiments par charriage ou suspension selon Wu & Lin (2014)	35
3.5.2	Evaluation du transport solide.....	36
4.	Analyse des morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques	38
4.1	Matériels et méthodes	38
4.2	Incertitudes des levés bathymétriques.....	42
4.3	Résultats	43
5.	Conclusion.....	47
6.	Bibliographie	48
7.	Annexes	49
7.1	Point P1	49
7.2	Point P2.....	68
7.3	Point P3.....	87

Table des figures

Figure 1. Carte de la zone d'étude avec l'emprise de la zone EMR BNO.	15
Figure 2. Carte bathymétrique 2025 de la zone BNO avec la localisation des points de calculs P1, P2 et P3 (maillage HYWAT) sélectionnés pour l'extraction des données hydrodynamiques. Le σ_v indique la valeur de l'incertitude verticale du levé. La référence verticale des données bathymétriques correspond au zéro de réduction des sondes concordant avec le zéro hydrographique du port de Roscoff.	17
Figure 3. Carte de localisation des échantillons sédimentaires prélevés dans la zone EMR BNO. La classification des natures sédimentaires est détaillée dans le Tableau 1 . Les natures sédimentaires « non déterminées », en gris, indiquent la remontée d'une benne vide.	18
Figure 4. Diagramme ternaire Silts + Argiles = Vases (<i>Mud</i>) – Sable (<i>Sand</i>) – Gravier (<i>Gravel</i>) avec les 46 prélèvements sédimentaires de la zone de BNO analysés (points noirs). L'orientation des tirets sur les axes indique le sens de lecture des proportions sédimentaires (en %).	19
Figure 5. Carte des natures sédimentaires du fond marin de la zone EMR BNO.	21
Figure 6. Répartition des faciès sédimentaires de la zone EMR BNO à partir de la carte de nature de fond présentée dans la Figure 5 . SV : sables et vases, S : sables ; SG : sables et graviers ; SC : sables et cailloutis ; GS : graviers et sables ; G : graviers ; GC : graviers et cailloutis ; R : roches.	22
Figure 7. Carte de localisation des structures sédimentaires, géologiques, et des objets anthropiques identifiés dans la zone EMR BNO.	23
Figure 8. Carte d'épaisseur sédimentaire de la zone EMR Bretagne Nord-Ouest. L'épaisseur en mètres est calculée à partir d'une célérité des ondes acoustique de 1500 m.s ⁻¹	24
Figure 9. Carte des courants maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les trois points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.	26
Figure 10. Rose de courant au point P1 du maillage du modèle. La rose de courant considère l'ensemble des courants sur la période 1979-2024 (rejeu HYWAT).	26
Figure 11. Carte des hauteurs significatives maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les trois points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.	27
Figure 12. Distribution des Hs en fonction des directions moyennes (D_m) au point P1 du maillage du modèle. La rose des vagues considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2024 (rejeu HYWAT).	28
Figure 13. Distributions mensuelles des hauteur significatives des vagues (Hs) au point P1 du maillage du modèle. Les extrémités des boîtes correspondent au 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartile de la distribution mensuelle. Les segments inférieurs et supérieurs correspondent respectivement aux valeurs des Hs minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.	28
Figure 14. Diamètres médians (D_{50}) des grains mesurés dans les 46 échantillons sédimentaires prélevés dans la zone d'étude EMR BNO. Les couleurs indiquent les classes sédimentologiques des échantillons (faciès).	30

Figure 15. Paramètres critiques de Shields et Soulsby (θ_{cr}) en fonction du diamètre de grain adimensionnel (D^*), extrait de Soulsby (1997), modifiée. Les contraintes critiques de cisaillement calculées pour BNO sont représentées par des cercles jaunes (formulation de Shields) et des croix bleues (formulation de Soulsby). 32

Figure 16. Proportion de temps (%) sur la période 1980-2024 durant laquelle le paramètre de Shields (θ) dépasse le seuil critique (θ_{cr}) de mise en mouvement, en fonction du D_{50} (échelle logarithmique) pour chaque point du rejeu HYWAT (P1, P2 et P3), selon l'action des vagues seules (triangles), du courant seul (croix) ou de la combinaison des deux (cercles). 34

Figure 17. Proportion du temps (en %) durant laquelle le seuil critique de la contrainte, en charriage ou en suspension, est dépassé sur la période 1980-2024, en fonction du D_{50} (échelle logarithmique). Les données sont calculées sur chaque point du rejeu HYWAT (P1, P2 et P3). 35

Figure 18. Pourcentage de temps de mobilité et du taux de transport sédimentaire selon les intervalles d'ordre de grandeur considérés, soit une échelle exponentielle (à partir de 10^{-13}) a. Point 1, b. Point 2 et c. Point 3. Les lignes rouges en pointillés marquent la limite entre la zone avec transport (droite) et sans transport (gauche). 37

Figure 19. Sondes bathymétriques historiques (points colorés selon la profondeur), acquises entre 1929 et 1973 dans la zone EMR BNO. L'incertitude verticale du levé est exprimée par le σ_v 40

Figure 20. Sondes bathymétriques historiques (points colorés selon la profondeur), acquises entre 1994 et 2012 dans la zone EMR BNO. L'incertitude verticale du levé est exprimée par le σ_v 41

Figure 21. Variabilité temporelle des différentiels bathymétriques dans la zone BNO. Les points noirs aux valeurs moyennes des différentiels (Δz), tandis que les barres d'erreur indiquent l'écart-type associé. La zone rouge ombrée correspond à l'enveloppe d'incertitude verticale totale ($\sigma_{v_{totale}}$), centrée sur zéro, dont les bornes supérieure et inférieure matérialisées par des lignes rouges. La ligne horizontale noire correspond au niveau de référence $\Delta z = 0$, atteinte s'il n'y a aucune différence bathymétrique entre le levé récent de 2025 et le levé ancien considéré. 44

Figure 22. Différentiel bathymétrique dans la zone d'étude BNO pour les levés de 1929 à 1973 comparés au levé 2025. Les variations bathymétriques sont représentées par des cercles colorés selon l'intervalle considéré. Les valeurs comprises dans l'intervalle d'incertitude verticale σ_v ne sont pas interprétables. Le point rouge sur le différentiel [2025 – 1973] (en bas à droite) est associé au naufrage d'un bateau survenu en 1973 ou antérieurement. 45

Figure 23. Différentiel bathymétrique dans la zone d'étude BNO pour les levés de 1994 à 2012 comparés au levé 2025. Les variations bathymétriques sont représentées par des cercles colorés selon l'intervalle considéré. Les valeurs comprises dans l'intervalle d'incertitude verticale σ_v ne sont pas interprétables. 46

Figure 24. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P1 (Ouest). a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). 49

Figure 25. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P1. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014). 49

Figure 26. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 50

Figure 27. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 50

Figure 28. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 51

Figure 29. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 51

Figure 30. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 52

Figure 31. Séries temporelles extraites au Point P1, sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux)..... 53

Figure 32. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 54

Figure 33. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 55

Figure 34. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 56

Figure 35. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 57

Figure 36. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 58

Figure 37. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 59

Figure 38. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 60

Figure 39. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 61

Figure 40. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04\text{mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total})..... 62

Figure 41. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total})..... 63

Figure 42. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22\text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total})..... 64

Figure 43. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38\text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total})..... 65

Figure 44. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21\text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total})..... 66

Figure 45. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71\text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total})..... 67

Figure 46. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 68

Figure 47. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 68

Figure 48. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 69

Figure 49. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 69

Figure 50. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 70

Figure 51. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 70

Figure 52. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71\text{ mm}$ au Point P2. a. Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), b. Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 71

Figure 53. Séries temporelles extraites au Point P2, sur la période 1980–2024. a. Hauteur significative des vagues, b. Période pic, c. Vitesse orbitale, d. Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux)..... 72

Figure 54. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 73

Figure 55. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 74

Figure 56. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 75

Figure 57. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 76

Figure 58. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 77

Figure 59. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 78

Figure 60. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 79

Figure 61. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 80

Figure 62. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 81

Figure 63. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 82

Figure 64. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 83

Figure 65. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 84

Figure 66. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 85

Figure 67. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 86

Figure 68. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 87

Figure 69. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 87

Figure 70. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 88

Figure 71. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 88

Figure 72. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 89

Figure 73. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 89

Figure 74. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014)..... 90

Figure 75. Séries temporelles extraites au Point P3, sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux)..... 91

Figure 76. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 92

Figure 77. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 93

Figure 78. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 94

Figure 79. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 95

Figure 80. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 96

Figure 81. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 97

Figure 82. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague}} + \text{courant}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}). 98

Figure 83. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 99

Figure 84. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 100

Figure 85. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 101

Figure 86. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 102

Figure 87. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 103

Figure 88. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 104

Figure 89. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Transport par charriage (q_b), **c.** Transport en suspension (q_s), **d.** Transport total (q_{total})..... 105

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification sédimentologique utilisée dans la zone d'étude BNO et photos d'échantillons secs.	20
Tableau 2. Valeurs médianes du D_{50} (en mm) pour les différentes classes granulométriques identifiées dans la zone d'étude (Figure 14).....	31
Tableau 3. Contraintes critiques de cisaillement (θ_{cr}) selon Shields (1936) et Soulsby (1997), et tailles de grains adimensionnelles (D^*), en fonction des sept D_{50} représentatifs des sédiments identifiés dans la zone BNO.	32
Tableau 4. Paramètres techniques des quatorze levés bathymétriques effectués entre 1929 et 2025 recoupant la zone EMR BNO.	39
Tableau 5. Synthèse des incertitudes verticales et horizontales – Les valeurs des incertitudes représentent l'addition des incertitudes des deux levés.	43

Glossaire

BH2	Bâtiment hydrographique de seconde classe. Navire du Shom utilisé pour l'acquisition de données bathymétriques.
BNO	Bretagne Nord-Ouest. Zone d'étude considérée dans ce rapport.
BDBS	Base de Données Bathymétriques du Shom. Base regroupant les levés bathymétriques historiques et récents utilisés pour analyser les évolutions du fond marin.
D_m	Direction moyenne de provenance des vagues.
D_{50}	Diamètre médian des sédiments.
EMR	Énergies Marines Renouvelables. Technologies exploitant l'énergie du milieu marin, notamment l'éolien en mer.
HOMONIM	Historique Observation Modélisation des Niveaux Marins. Base de données et programme du Shom fournissant des niveaux marins observés et modélisés.
H_s	Hauteur significative des vagues (m). Indicateur statistique de l'état de mer.
HYCOM	Hybrid Coordinate Ocean Model. Modèle numérique utilisé pour simuler les courants marins.
HYWAT	Hydrodynamics and Waves Hindcast. Rejeu numérique des conditions de courant, niveau d'eau et houle sur une longue période.
MES	Matières en suspension. Particules transportées dans la colonne d'eau.
MNT	Modèle Numérique de Terrain. Représentation numérique de la bathymétrie utilisée pour les analyses morphologiques et hydrodynamiques.
qb	Flux de transport sédimentaire par charriage (transport au fond).
qs	Flux de transport sédimentaire en suspension.
SMF	Sondeur multifaisceaux. Instrument acoustique utilisé pour mesurer la bathymétrie.
σ_v	Incertitude verticale associée à une mesure bathymétrique.
Δz	Différence d'altitude du fond marin entre deux levés bathymétriques.

1. Introduction

Ce rapport présente les résultats de l'analyse des conditions de mise en mouvement des sédiments marins et l'analyse de l'évolution morphologique des fonds marins et des structures sédimentaires observées dans la zone d'étude EMR Bretagne Nord-Ouest (BNO). Cette zone, identifiée pour l'installation de futurs parcs éoliens, se situe en Manche, au large de l'île de Batz.

La présente étude s'appuie sur une simulation numérique à haute résolution d'états de mer, de courants et de niveaux d'eau sur une période de 45 ans (1980 à 2024), ainsi que sur des données sédimentologiques collectées dans cette zone. Le rapport traite de « **l'analyse des conditions de mise en mouvement des sédiments** » et du type de transport sédimentaire avec :

- Une recherche bibliographique et un rappel des conditions météo-océaniques présentées dans le lot 1 « état initial de la connaissance », concernant les caractéristiques des principaux forçages à l'origine de la dynamique sédimentaire propre au site d'étude (niveaux d'eau, courants, états de mer, apports solides) ;
- Les statistiques de mise en mouvement des sédiments calculées à partir des forçages hydrodynamiques (niveaux d'eau, courants et états de mer) en fonction des différentes classes granulométriques sédimentaires identifiées sur la zone d'étude ;
- Des indications sur les contributions respectives du courant et des états de mer au transport total ensuite déduites, ainsi que le mode de transport dominant (charriage ou suspension) en fonction de la granulométrie et des conditions hydrodynamiques.

« **L'analyse des morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques** » est également abordé afin d'identifier et de caractériser les morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques, telles que des dunes ou des bancs sableux, et d'évaluer leur évolution passée à partir des données disponibles.

L'analyse repose notamment sur :

- L'exploitation des données bathymétriques historiques, issues principalement des bases de données du Shom ;
- L'observation de tendances évolutives à l'aide de différentiels bathymétriques ;
- L'identification de l'évolution dans le temps des potentielles structures morphologiques significatives.

La première partie de ce rapport concerne l'état des connaissances de la zone d'étude BNO, présentant les types de sédiments, les apports fluviaux, la dynamique de marée, la bathymétrie, les structures géologiques et les conditions océaniques (états de mer, courants et niveaux d'eau).

Dans une seconde partie, le rapport présente l'étude statistique des conditions de mise en mouvement des sédiments, en détaillant la méthodologie appliquée, la définition des classes granulométriques représentatives de la zone d'étude, le calcul des seuils critiques de mobilité, ainsi que l'évaluation des modes de transport sédimentaire et de leur intensité.

Enfin, une troisième partie se concentre sur l'exploitation des données bathymétriques historiques et l'étude des différentiels bathymétriques pour caractériser les structures morphologiques évolutives.

2. Etat de la connaissance de la zone d'étude

2.1 Localisation

La zone EMR BNO, d'une superficie de 350 km², est située en Manche, à 16 km au large de l'île de Batz (Figure 1).

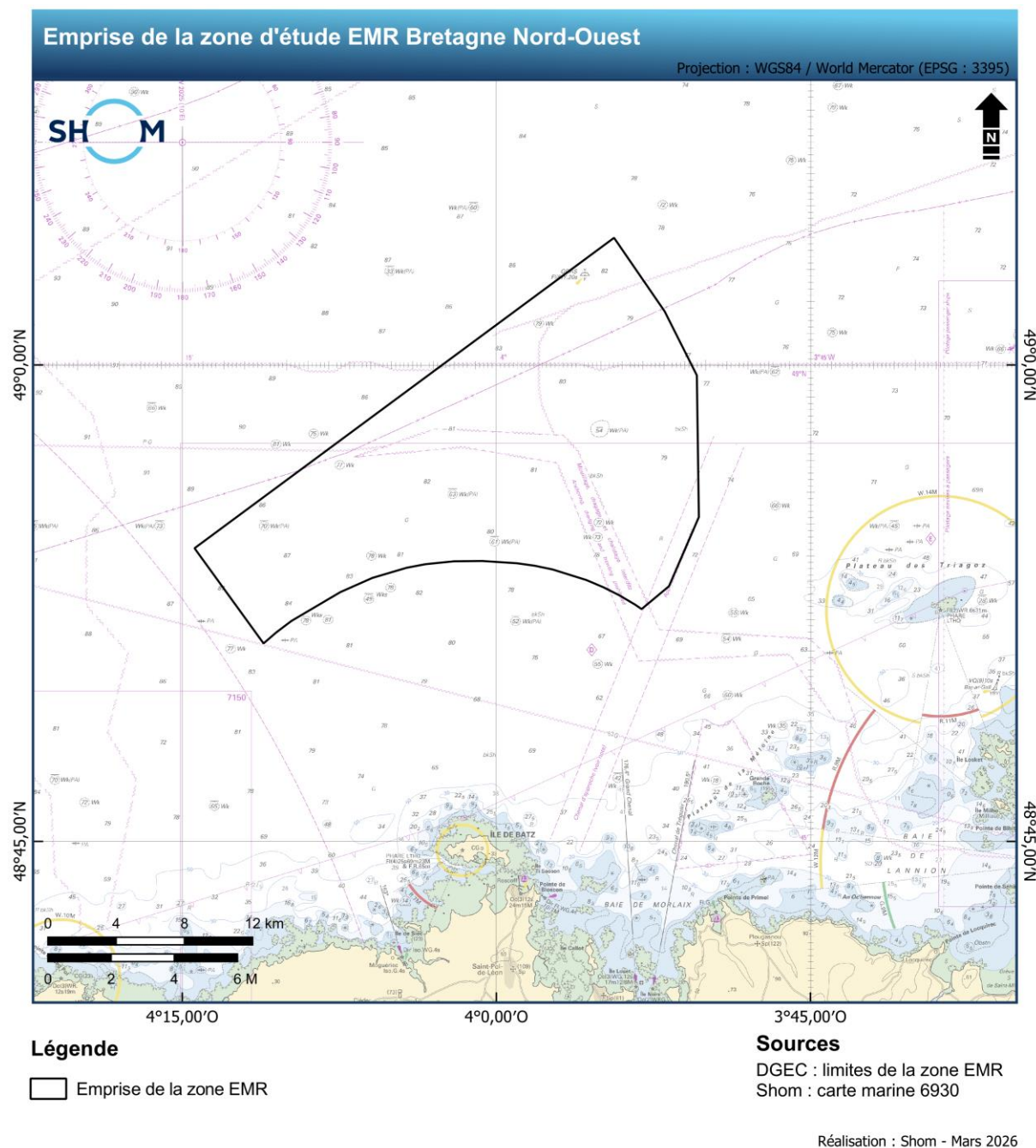
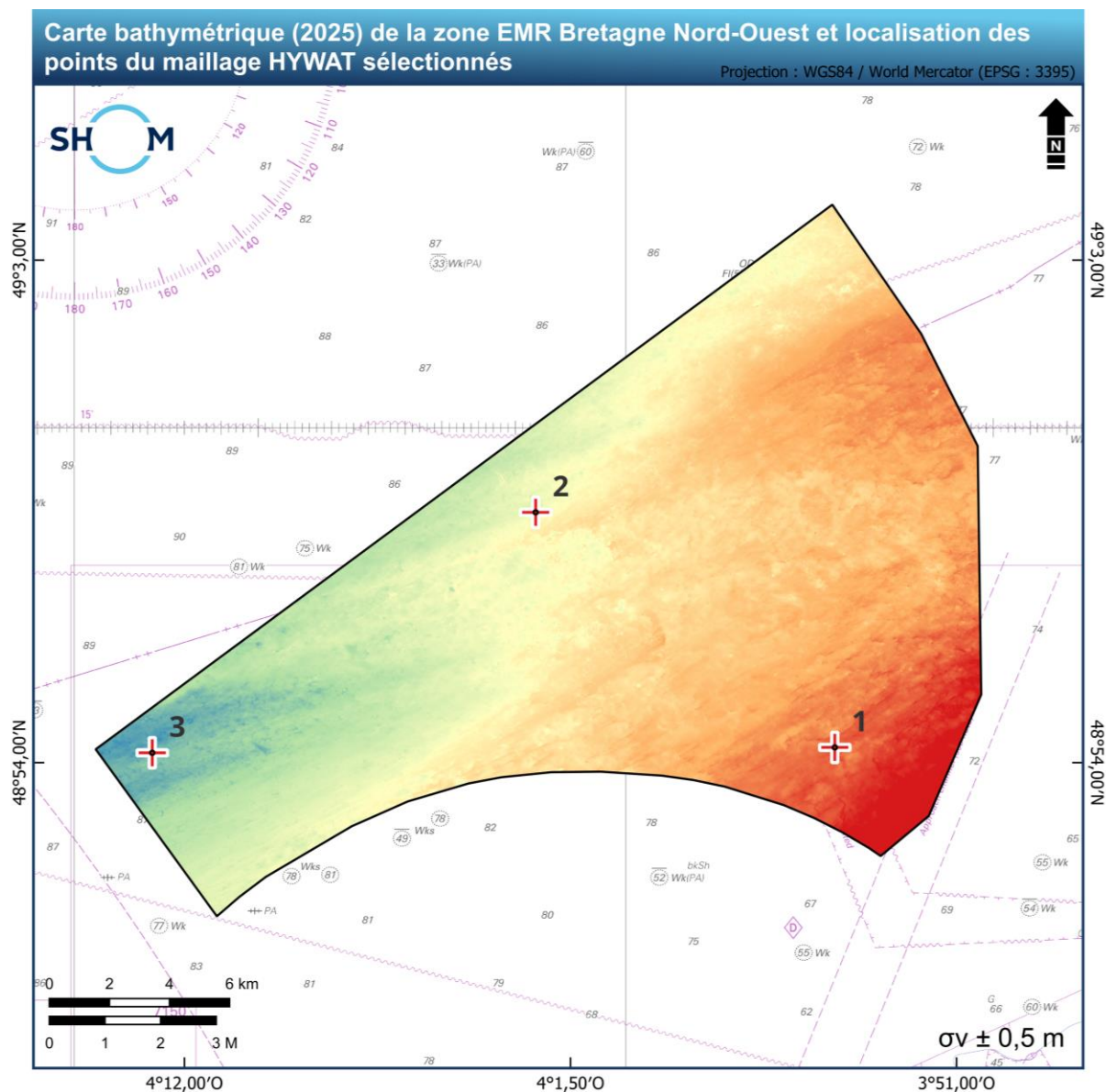




Figure 1. Carte de la zone d'étude avec l'emprise de la zone EMR BNO.

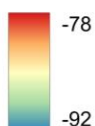
2.2 Bathymétrie

Le levé bathymétrique de la zone a été réalisé en 2025 par le GHOA lors du levé S20251700 (2025), au sondeur multifaisceaux (**Figure 2**). Il a permis de produire un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à très haute résolution (2 m) en appliquant les corrections nécessaires (marée, tirant d'eau, attitude, cap, célérité).

La zone d'étude présente des profondeurs comprises entre 78 m et 92 m, selon le zéro hydrographique du port de Roscoff (**Figure 2**). La bathymétrie générale met en évidence une morphologie relativement plane ($< 1^\circ$), avec des inclinaisons plus marquées au niveau des escarpements rocheux (cf. T4.S4_RAP). Le gradient de profondeur est croissant d'est en ouest, avec des profondeurs plus faibles à l'est (78 m au minimum) et une zone plus profonde à l'ouest (jusqu'à 92 m). Ce gradient croissant de la profondeur est orienté du sud-est au nord-ouest.

**Légende**

-  Emprise de la zone EMR
-  Points du maillage HYWAT

Profondeur (m)**Sources**

DGEC : limites de la zone EMR
 Shom : MNT bathymétrique, carte marine 6930
 Wavewatch III : maillage HYWAT

Réalisation : Shom - Mars 2026

Figure 2. Carte bathymétrique 2025 de la zone BNO avec la localisation des points de calculs P1, P2 et P3 (maillage HYWAT) sélectionnés pour l'extraction des données hydrodynamiques. Le σ_v indique la valeur de l'incertitude verticale du levé. La référence verticale des données bathymétriques correspond au zéro de réduction des sondes concordant avec le zéro hydrographique du port de Roscoff.

2.3 Paramètres sédimentaires

2.3.1 Faciès sédimentaire

Les prélèvements sédimentaires dans la zone EMR BNO ont été réalisés par le navire hydrographique de deuxième classe (BH2) *Borda*, à l'aide d'une benne Shipeck. Ces mesures ont été acquises spécifiquement pour cette zone EMR par le Shom. 54 stations ont été visitées au cours du levé S202501700, dont les emplacements sont illustrés dans la **Figure 3**. Sur les 54 stations sédimentaires du levé S202501700, 46 ont permis de récupérer des échantillons exploitables pour les analyses sédimentologiques. L'absence de prélèvement sur les huit stations restantes est probablement liée à des conditions de fond défavorables (irrégularité, induration ou présence de blocs rocheux).

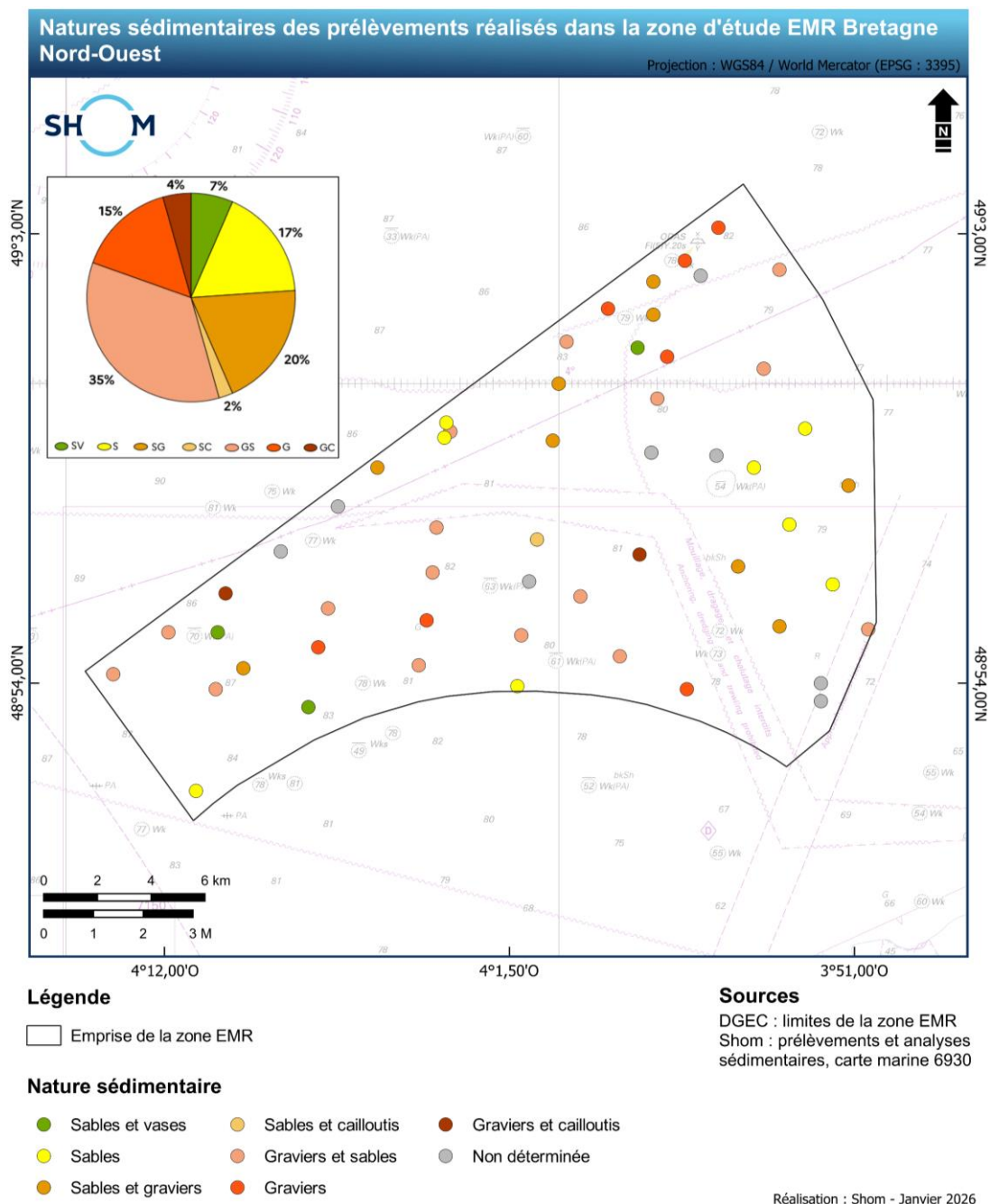


Figure 3. Carte de localisation des échantillons sédimentaires prélevés dans la zone EMR BNO. La classification des natures sédimentaires est détaillée dans le **Tableau 1**. Les natures sédimentaires « non déterminées », en gris, indiquent la remontée d'une benne vide.

Le diagramme ternaire (**Figure 4**) illustre la distribution granulométrique des 46 échantillons analysés (**Figure 3**). Il permet de distinguer les faciès sédimentaires en fonction de leurs proportions relatives de sable, de gravier et de vase (fraction fine composée d'argile et de silt, **Tableau 1**). Les résultats révèlent une prédominance de sédiments relativement grossiers dans la zone d'étude. En effet, les échantillons sont principalement constitués d'un mélange de graviers et de sables (**Figure 4**). Par ailleurs, la faible teneur en vases (silts et argiles), inférieure à 4 % (**Figure 4**), permet de classer ces sédiments comme non-cohésif. Contrairement aux sédiments cohésifs constitués de fines particules liées par des forces intergranulaires, les sédiments non-cohésifs ne présentent pas de liaison significative entre les grains. Leur mise en mouvement dépend donc directement des contraintes hydrodynamiques au fond de la colonne d'eau, ce qui implique un transport principalement par charriage et saltation.

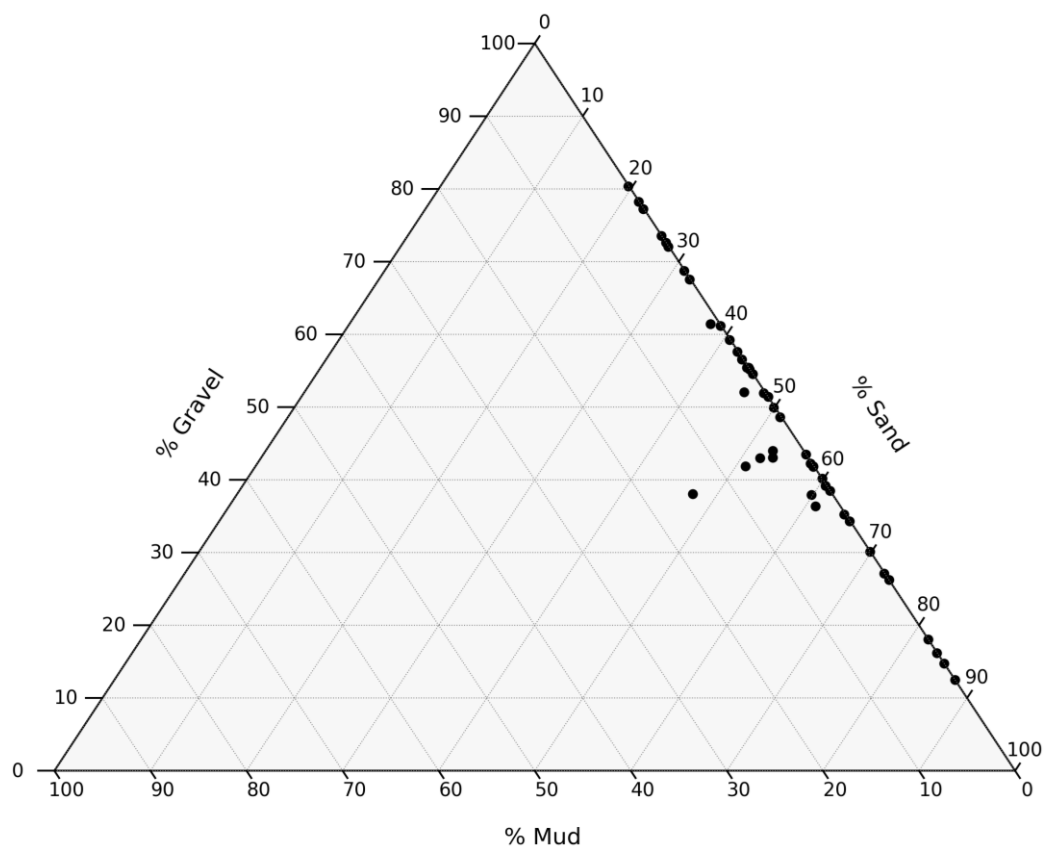





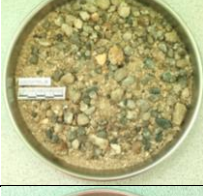



Figure 4. Diagramme ternaire Silts + Argiles = Vases (*Mud*) – Sable (*Sand*) – Gravier (*Gravel*) avec les 46 prélèvements sédimentaires de la zone de BNO analysés (points noirs). L'orientation des tirets sur les axes indique le sens de lecture des proportions sédimentaires (en %).

La classification sédimentologique des échantillons prélevés dans la zone d'étude repose sur sept natures granulométriques synthétisées dans le **Tableau 1**. Chaque faciès est déterminé en fonction des proportions (en %, **Tableau 1**) de vase (V), sable fin (SF), sable (S), gravier (G) et cailloutis (C), définis selon la taille des particules (T), réparties comme suit :

- $T \geq 20$ mm : cailloutis ;
- $20 \text{ mm} > T \geq 2$ mm : graviers ;
- $2 \text{ mm} > T \geq 0,25$ mm : sables ;
- $0,25 \text{ mm} > T \geq 0,05$ mm : sables fins ;
- $T < 0,05$ mm : vases.

Tableau 1. Classification sédimentologique utilisée dans la zone d'étude BNO et photos d'échantillons secs.

Classe	Code	Critère	Légende	Exemple de photo
Sables et vases	SV	$S+SF > C+G$ et $5 < V < 20\%$ et $S > SF$		
Sables	S	$50 < S < 100\%$ et $C+G < 35\%$ et $V < 5\%$		
Sables et graviers	SG	$50 < S < 65\%$ et $C+G > 35\%$ et $G > C$ et $V < 5\%$		
Sables et cailloutis	SC	$50 < S < 65\%$ et $C+G > 35\%$ et $C > G$ et $V < 5\%$		
Graviers et sables	GS	$50 < G < 65\%$ et $S+SF > 35\%$ et $V < 5\%$		
Graviers	G	$50 < G < 100\%$ et $S+SF < 35\%$ et $C < 15\%$ et $V < 5\%$		
Graviers et cailloutis	GC	$50 < G < 65\%$ et $S+SF < 35\%$ et $C > 15\%$ et $V < 5\%$		

2.3.2 Répartition des types de nature des fonds

La combinaison et l'interprétation des données acquises lors du levé S20251700 (imagerie, bathymétrie et prélèvements sédimentaires), permettent de cartographier les variations sédimentaire du fond à haute résolution sur la zone EMR (**Figure 5** ; T4.S4, Shom, 2025).

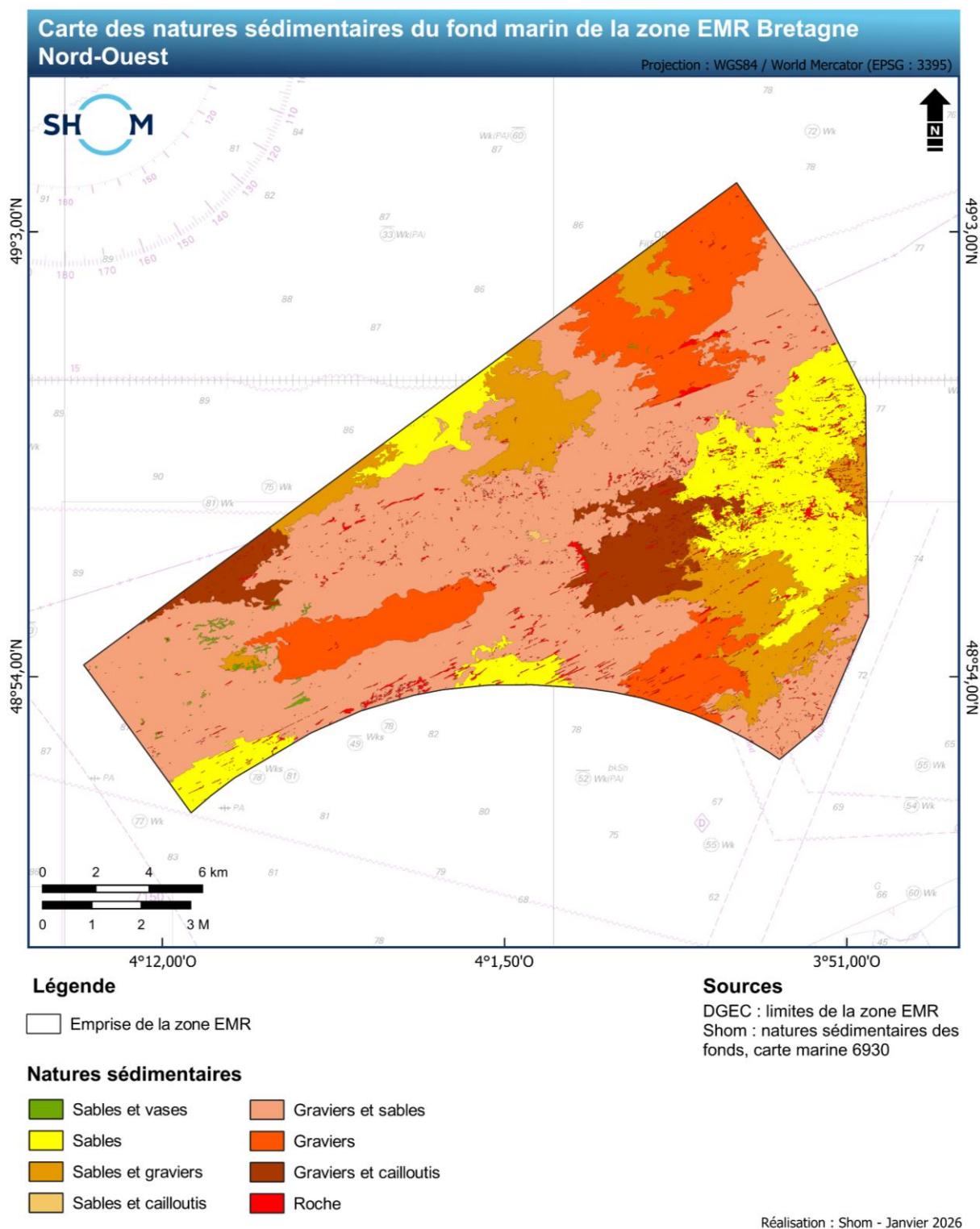


Figure 5. Carte des natures sédimentaires du fond marin de la zone EMR BNO.

L'ensemble de ces données a permis d'identifier plusieurs types de sédiments dans ce secteur d'étude, avec du plus fin au plus grossier : les sables et vases (SV), les sables (S), les sables et graviers (SG), les sables et cailloutis (SC), les graviers et sables (GS), les graviers (G), et les graviers et cailloutis (GC). La carte présentée dans la **Figure 5** illustre la répartition spatiale de ces différents faciès sédimentaires ainsi que des roches affleurantes.

L'analyse de la répartition surfacique des différents faciès sédimentaires au sein de la zone EMR BNO (**Figure 6**) met en évidence une prédominance du faciès sédimentaire graviers et sables (GS), qui couvre environ 50 % de la surface totale du fond. Les faciès sables (S), sables et graviers (SG) et graviers (G) représentent respectivement 15 %, 12 % et 14 % de la surface du fond. Les faciès sables et vases (SV), sables et cailloutis (SC) et graviers et cailloutis (GC) sont les moins représentés avec respectivement < 1 % pour SV et SC, et 6 % pour GC (T4.S4, Shom, 2025). Les roches (R) affleurantes, sont quant à elles présentent sur 3 % de la surface du fond.

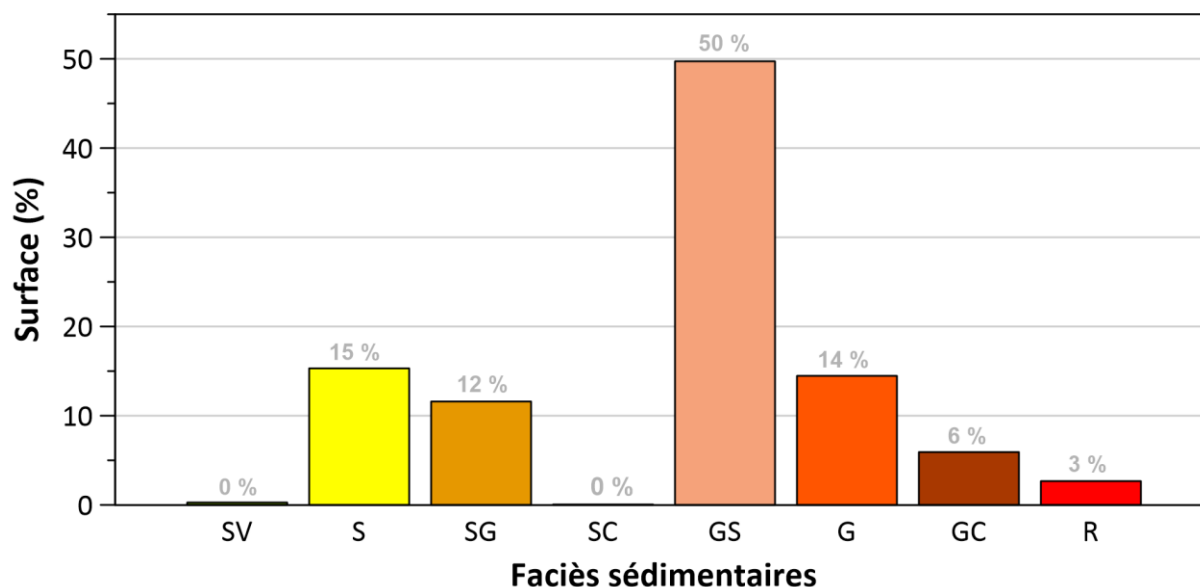


Figure 6. Répartition des faciès sédimentaires de la zone EMR BNO à partir de la carte de nature de fond présentée dans la **Figure 5**. SV : sables et vases, S : sables ; SG : sables et graviers ; SC : sables et cailloutis ; GS : graviers et sables ; G : graviers ; GC : graviers et cailloutis ; R : roches.

2.3.3 Structures sédimentaires, géologiques et objets anthropiques

Cette partie synthétise les principales conclusions du rapport T4.S4 (Shom, 2025) concernant les structures sédimentaires, géologiques, et les objets anthropiques identifiés dans la zone EMR BNO. Ces éléments sont cartographiés dans la **Figure 7**, qui regroupe l'ensemble de ces observations dont :

- Des petites à grandes dunes ; avec des formes différentes de linéaires à sinueuses (voir les deux zooms sur la **Figure 7**)
- Plusieurs milliers de petites dépressions circulaires de diamètres compris entre 5 m et 10 m, et une profondeur allant de 0,2 m à 0,8 m ;
- Une vingtaine de dépressions majeures de diamètres compris entre 20 et 110 m, et une profondeur excédante 1 m ;
- Des structures rocheuses longitudinales, correspondant à des reliefs d'environ 1 m de hauteur et allongés sur 50 m à 1 km ;
- 16 épaves et obstructions.

2.3.4 Epaisseur sédimentaire

La carte d'épaisseur des sédiments meubles superficiels, élaborée à partir de l'interpolation des profils sismiques indiquent que l'épaisseur de la couverture sédimentaire, dans la zone d'étude, varie de 0 à 3 m, pour une épaisseur moyenne de $0,5 \pm 0,3$ m (**Figure 8**). Cette couverture sédimentaire, bien que globalement homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, laisse localement affleurer le substratum rocheux. Les structures sédimentaires correspondent aux zones où les épaisseurs sont les plus marquées, sans toutefois dépasser 3 m (**Figure 8**).

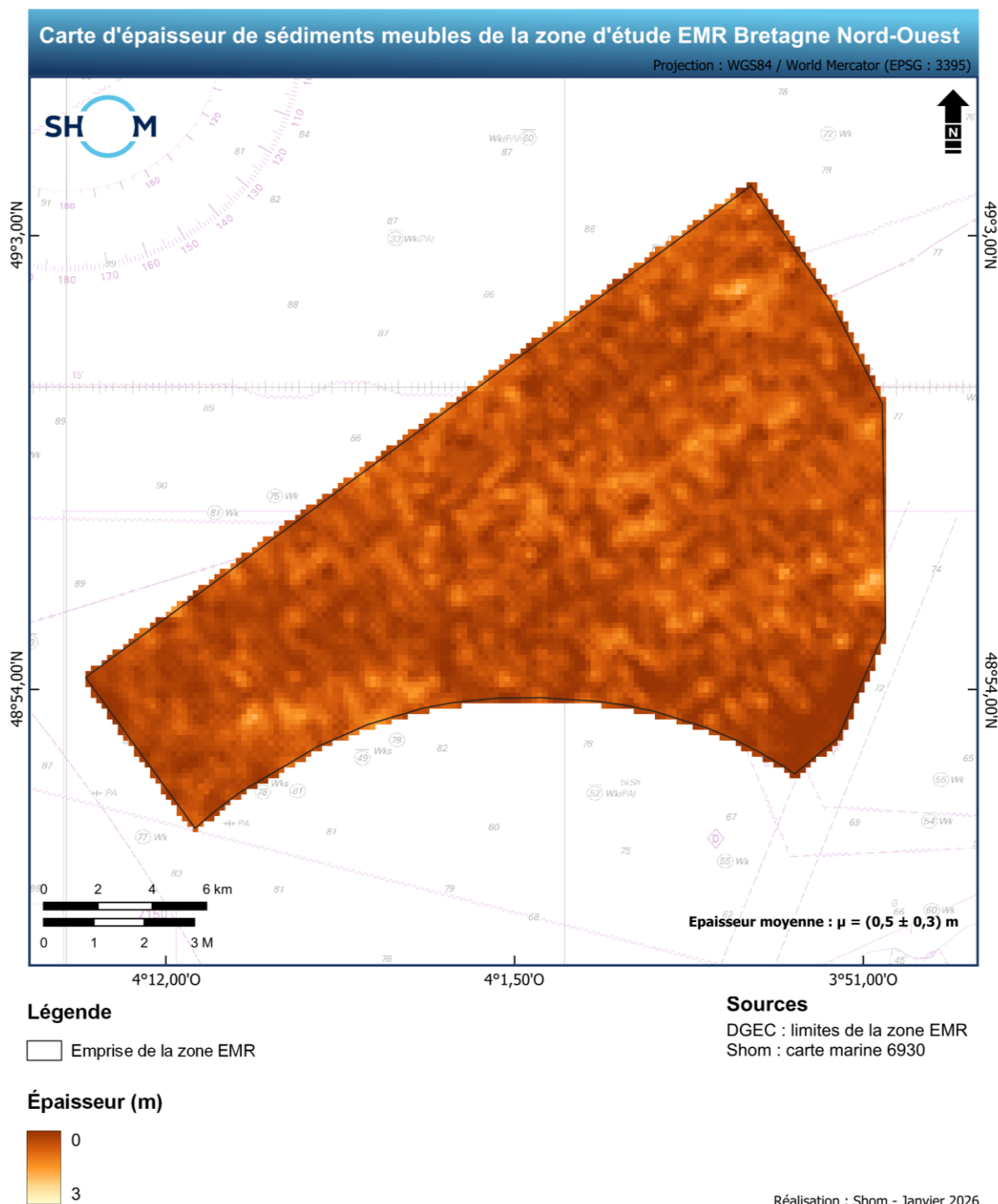


Figure 8. Carte d'épaisseur sédimentaire de la zone EMR Bretagne Nord-Ouest. L'épaisseur en mètres est calculée à partir d'une célérité des ondes acoustique de $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.4 Paramètres hydrodynamiques

2.4.1 Niveau d'eau

Selon le rapport T1.M3_RAP (Shom, 2024), au large du plateau continental armoricain, l'océan est soumis au régime des marées de l'Atlantique Nord avec une onde de marée qui longe les côtes bordant l'océan Atlantique et qui poursuit sa propagation du sud vers le nord. En Manche Ouest, la marée est de type essentiellement semi-diurne, où les ondes M2 (influence lunaire de période 12h24) et S2 (influence solaire de période 12h) sont prédominantes. La marée sur les côtes métropolitaines (hors méditerranée) présente ainsi chaque jour deux pleines mers et deux basses mers se succédant avec un intervalle moyen de 6 heures 13 minutes. La propagation de l'onde de marée, en Manche Ouest, est accompagnée d'une augmentation importante du marnage. Le marnage observé est de 7,5 à 8 m en moyenne sur la zone d'étude. Les valeurs de marnage pour des coefficients de marée caractéristiques sont disponibles sur le site <http://data.shom.fr>.

2.4.2 La réanalyse HYWAT : marée, surcote, courant, vague

Le produit numérique dénommé HYWAT consiste en des rejoues de modèles numériques de marées, surcotes, courants et vagues entre 1979 et 2024, sur la façade atlantique française, forcés par la réanalyse atmosphérique ERA5. Il est accessible librement sur le site de diffusion du Shom : [Rejoues climatologiques 1979-2022 de marées, surcotes et vagues sur la façade Atlantique](#). Les configurations atlantiques françaises des modèles HYCOM et Wavewatch III®, modèles développés dans le cadre du projet HOMONIM ont été utilisées. La complémentarité des modèles HYCOM et WaveWatch III® permet une analyse intégrée des dynamiques océaniques dans la zone EMR BNO. Alors que HYCOM simule les courants et les surcotes, WaveWatch III® caractérise les états de mer. Leur couplage fournit les informations cruciales pour évaluer les processus sédimentaires à l'échelle de la zone d'étude.

Trois nœuds du maillage HYWAT ont été sélectionnés pour l'extraction des données relatives aux forçages hydrodynamiques. Leurs localisations sont présentées dans la **Figure 2** :

- **P1** : nœud n° 58647 du maillage (-3.9052 ; 48.9045),
- **P2** : nœud n° 59184 du maillage (-4.0408 ; 48.9748),
- **P3** : nœud n° 59187 du maillage (-4.2146 ; 48.9030).

Leur choix tient compte du régime de vagues, des courants, de la nature du fond et de la bathymétrie. Cette sélection vise à représenter au mieux la variabilité spatiale de ces paramètres au sein de la zone EMR BNO.

2.4.3 Analyse des conditions hydrodynamiques aux points du maillage du modèle

2.4.3.1 Courant

La **Figure 9** illustre les courants barotropes (uniformes sur la colonne d'eau) moyens et maximaux sur la période de simulation 1979-2024 issus du produit HYWAT. Dans la zone d'étude EMR, les vitesses des courants sont comprises entre 0,30 m.s⁻¹ et 0,50 m.s⁻¹ (**Figure 9**). Les valeurs maximales sont comprises entre 1,00 et 1,25 m.s⁻¹ dans la zone d'étude. À l'ouest de la zone, les courants de marée portent vers l'est-nord-est pendant le flot et à l'ouest-sud-ouest pendant le jusant. Au sud et sud-est de la zone, les ondes de marée sont davantage contraintes par la bathymétrie à l'approche des côtes. Ainsi les courants de flot portent au nord-est tandis que les courants de jusant portent au sud-ouest. Ces différences de direction sont présentées dans l'Atlas des courants de marée (rapport courant, Shom, 2025).

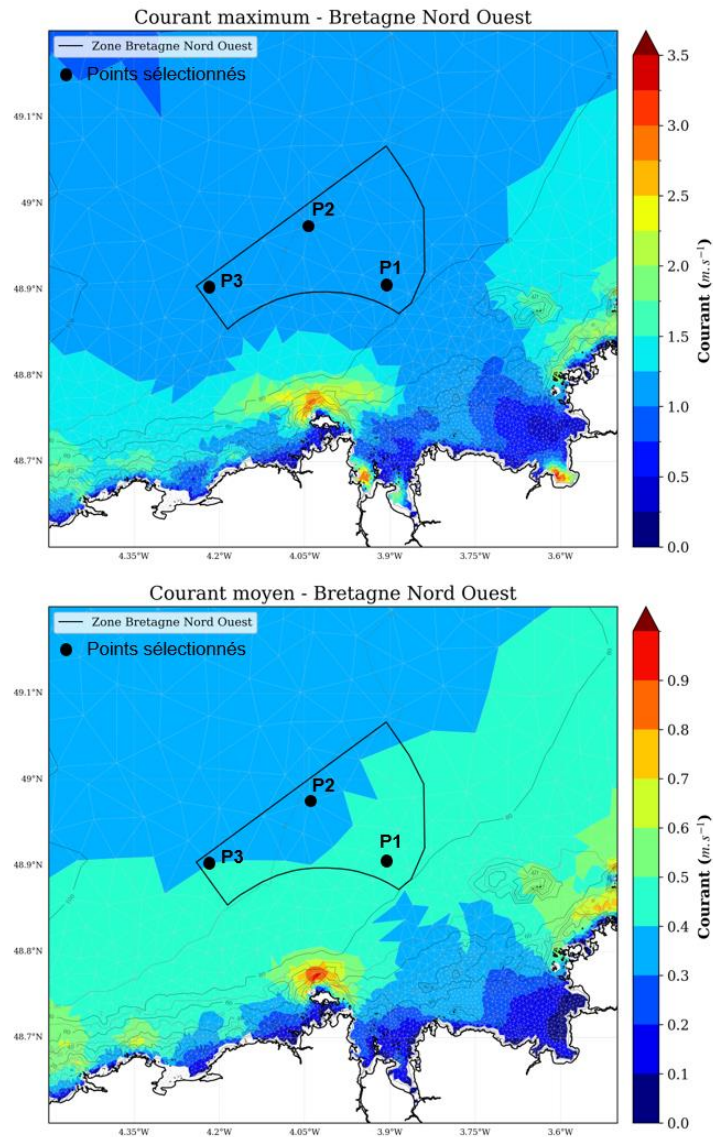


Figure 9. Carte des courants maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les trois points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.

La rose de courant établie sur l'ensemble de la base de données met en évidence des courants majoritairement dirigés vers les secteurs ouest et est (**Figure 10**). Ce qui est cohérent avec les structures sédimentaires visibles dans la zone.

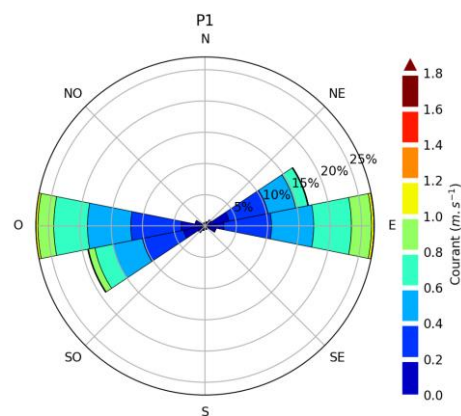


Figure 10. Rose de courant au point P1 du maillage du modèle. La rose de courant considère l'ensemble des courants sur la période 1979-2024 (rejeu HYWAT).

Cette observation est cohérente avec les structures sédimentaires visibles dans la zone. En effet, les dunes présentent des crêtes orientées selon un axe Nord-Sud, s'organisant perpendiculairement aux forçages hydrodynamiques dominants (**Figure 7**). Par ailleurs, les roses de courant aux points P2 et P3 montrent des distributions similaires.

2.4.3.2 Vague

Les hauteurs significatives moyennes et maximales des vagues sur l'ensemble de la période rejouée (1979-2024) sont présentées dans la **Figure 11**. La hauteur significative (H_s) moyenne des vagues dans la zone d'étude EMR est comprise entre 1,8 m et 2,2 m (**Figure 11**). Les hauteurs significatives maximales atteignent 11 m, à l'ouest, au niveau du point P3 (**Figure 11**). Dans l'ensemble, les hauteurs significatives de vagues H_s sont homogènes, malgré un faible gradient ouest / est résultant de la dissipation des vagues sur les côtes de la Manche, et un faible gradient nord-ouest / sud-est lié aux variations bathymétriques à l'approche de la côte.

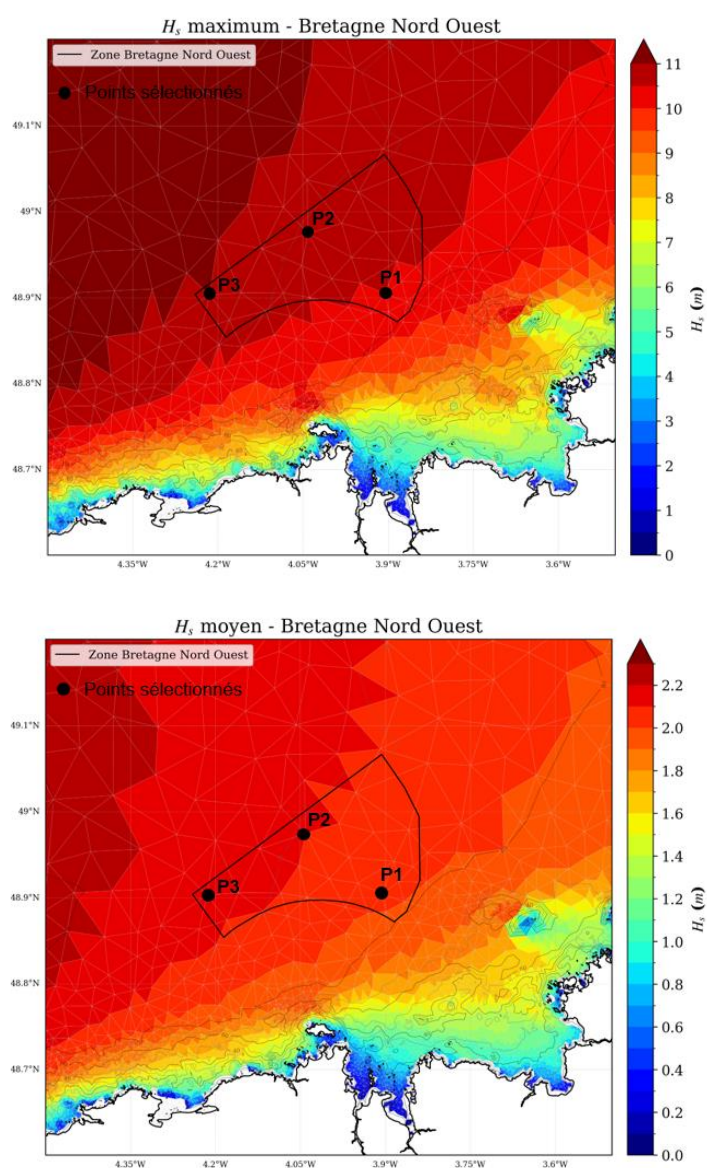


Figure 11. Carte des hauteurs significatives maximum (haut) et moyens (bas) modélisés sur la période 1979-2024 avec le rejeu HYWAT. Les trois points du maillage HYWAT sélectionnés sont représentés par des points noirs.

Seules les analyses effectuées au point P1 sont présentées dans cette section, les résultats obtenus pour les points P2 et P3 étant similaires et menant aux mêmes conclusions. Les vagues proviennent quasi-exclusivement des secteurs ouest-sud-ouest à nord-est, et majoritairement des directions ouest et ouest-nord-ouest (environ 75 % du temps) (**Figure 12**).

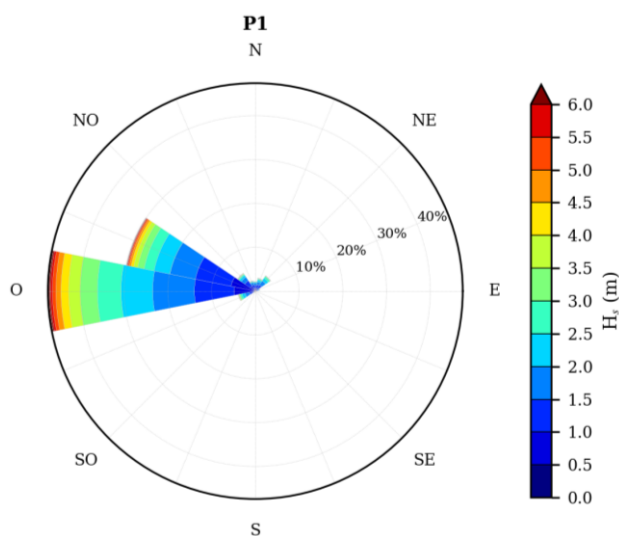


Figure 12. Distribution des H_s en fonction des directions moyennes (D_m) au point P1 du maillage du modèle. La rose des vagues considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2024 (rejeu HYWAT).

La **Figure 13** met en évidence la variabilité saisonnière qui module la distribution des H_s dans la zone d'étude au cours de l'année. Les moyennes et médianes mensuelles sont d'environ 1,5 m d'avril à septembre, et comprises entre environ 2 m et 3 m d'octobre à mars. Les valeurs maximales atteignent 7 m de mai à août, et sont supérieures à 7,5 m de septembre à avril. Lors des états de mer les plus énergétiques, comme lors de la tempête Johanna du 10 mars 2008, les hauteurs significatives maximales peuvent dépasser 10 m dans la zone (**Figure 13**).

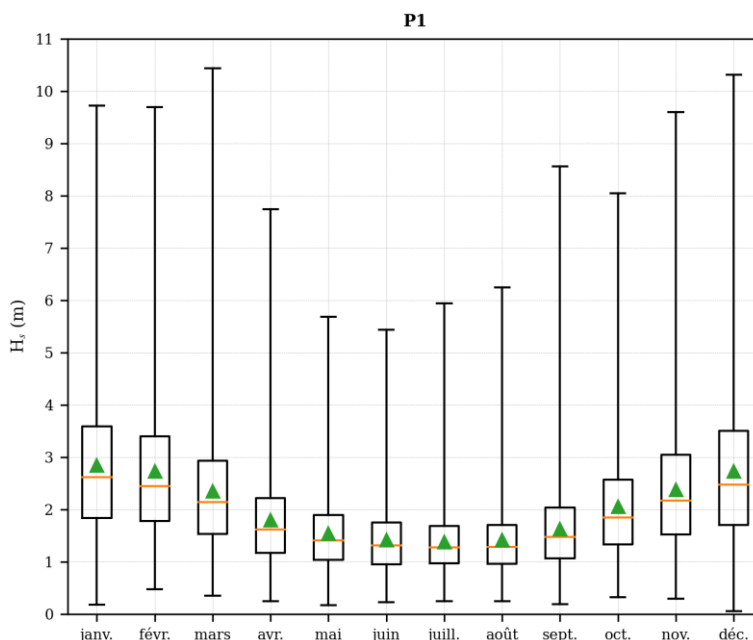


Figure 13. Distributions mensuelles des hauteur significatives des vagues (H_s) au point P1 du maillage du modèle. Les extrémités des boîtes correspondent au 1^{er} et 3^{ème} quartile de la distribution mensuelle. Les segments inférieurs et supérieurs correspondent respectivement aux valeurs des H_s minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.

2.5 Apports fluviaux

Les apports fluviaux constituent une source majeure de particules sédimentaires en suspension (MES) dans les environnements côtiers. Ces apports contrôlent en partie la distribution spatiale de la turbidité, en particulier à proximité des embouchures où les concentrations peuvent être élevées. En Manche, la caractérisation de ces apports repose principalement sur les mesures acquises dans le cadre des programmes FLUXMANCHE, qui ont permis d'obtenir des profils verticaux de concentration en MES à grande échelle, depuis le détroit du Pas de Calais jusqu'à la Manche centrale et orientale (Lafite et al., 1992 ; Velegrakis et al., 1996 ; Ismaïli et al., 1999 ; Velegrakis et al., 1999 ; Rivier, 2013). Ces observations mettent en évidence un gradient décroissant de concentration entre la côte et le large, lié à la dilution progressive des panaches fluviaux et à la sédimentation des particules lors de leur transport. Ainsi, les concentrations diminuent avec l'éloignement des sources continentales.

Située à environ 20 km du littoral pour sa limite la plus proche et en eaux relativement profondes, la zone d'étude présente des concentrations de MES faibles, comprises entre 0 et 1 mg·L⁻¹ (Velegrakis et al., 1999 ; Rivier, 2013), nettement inférieures à celles observées à proximité des embouchures fluviales (≈ 25 mg·L⁻¹ au maximum). Ces valeurs traduisent une influence limitée des apports fluviaux dans la zone considérée.

Il convient toutefois de noter qu'une variabilité saisonnière peut moduler l'extension et l'intensité des panaches fluviaux, avec des concentrations généralement plus élevées en période hivernale qu'estivale, ainsi qu'une variabilité interannuelle (Rivier, 2013).

3. Analyse de la mise en mouvement des sédiments et évaluation du transport solide

3.1 Méthodologie

La mise en mouvement des sédiments est le résultat d'une interaction complexe entre différents forçages hydrodynamiques — profondeur, courants, vagues —, la bathymétrie locale, ainsi que les propriétés granulométriques des particules (Le Hir, 2008 ; Rivier, 2013). La mobilisation des sédiments se produit lorsque la contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement sur le fond dépasse une valeur critique de mise en mouvement (θ_{cr}), généralement exprimée à l'aide du paramètre de **Shields (1936)**. Ce paramètre adimensionnel représente le rapport entre la contrainte hydrodynamique au fond et les forces gravitaires retenant les particules sur le fond. Lorsqu'il dépasse une valeur seuil, les sédiments peuvent être mis en mouvement (Shields, 1936 ; Soulsby, 1997 ; Le Hir, 2008).

Les travaux de **Soulsby (1997)** constituent une référence majeure pour l'évaluation de la mise en mouvement des sédiments sous l'influence distincte et combinée des vagues et des courants (e.g. Le Hir, 2008 ; Rivier, 2013). Cette approche permet de mieux comprendre la contribution relative de chaque forçage à l'initiation du mouvement sédimentaire, sans toutefois permettre d'estimer les quantités transportées.

Dans cette étude, afin de caractériser le transport des sédiments sur la période 1980–2024, nous avons utilisé la formulation de **Wu & Lin (2014)**. Ces auteurs distinguent notamment les deux modes principaux de transport : le charriage et la suspension. Le charriage correspond au déplacement des particules à proximité du fond, par roulement, glissement ou saltation, et domine pour les sédiments grossiers dans des régimes de courant modérés. La suspension concerne quant à elle les particules plus fines maintenues en suspension dans la colonne d'eau et advectées par l'écoulement. Dans la présente étude, nous appliquons leur méthodologie pour caractériser les types dominants de transport sédimentaire sur la période 1980–2024.

Le transport solide total est calculé comme la somme des contributions respectives des transports par charriage et suspension, évaluées indépendamment pour chaque classe

granulométrique en fonction des conditions hydrodynamiques combinées de vagues et de courant, considérées de façon instantanée à une fréquence horaire, avec une profondeur évoluant au gré des marées. Cette démarche permet d'identifier le mode de transport dominant et de quantifier leur contribution respective.

Les calculs et les visuels présentés dans ce chapitre ont été réalisés à l'aide de plusieurs scripts Python développés spécifiquement pour ce travail. Ces scripts permettent l'importation des données d'entrée (sédimentaires et hydrodynamiques), l'application des formules et la création des visuels.

3.2 Définition des tailles de grains représentatives de la zone BNO

Pour cette étude, les valeurs de D_{50} (diamètre médian) sont calculées à partir de l'analyse de l'ensemble des échantillons sédimentaires (**Figure 3**) qui sont répartis selon sept classes sédimentologiques. Pour chacune des classes, le nombre d'échantillons et l'intervalle de tailles observé [D_{50} min – D_{50} max] sont indiqués, ainsi que la médiane (**Figure 14**). Cette approche permet de visualiser la distribution granulométrique et d'identifier une valeur médiane de D_{50} représentative pour chaque classe sédimentaire. Ainsi, les classes les plus fines (SV, S, SG et SC) sont caractérisées par des D_{50} inférieurs à 2 mm, tandis que les classes plus grossières (GS, G et GC) sont caractérisées par des D_{50} supérieurs à 2 mm. La dispersion des valeurs est nettement plus importante pour les sédiments grossiers. Avec 16 échantillons, la classe sédimentaire « graviers et sables » est la plus représentée.

Les prélèvements réalisés sur la zone d'étude ont permis d'identifier uniquement deux échantillons correspondant à la classe GC (gravier-cailloutis). La variabilité observée pour cette classe s'explique par le caractère hétérogène de ces échantillons, qui présentent des distributions granulométriques distinctes et, par conséquent, des valeurs de D_{50} différentes. Néanmoins, compte tenu du nombre limité d'échantillons disponibles pour cette classe, cette variabilité doit être interprétée avec prudence et ne peut être considérée comme pleinement représentative de cette classe sédimentaire.

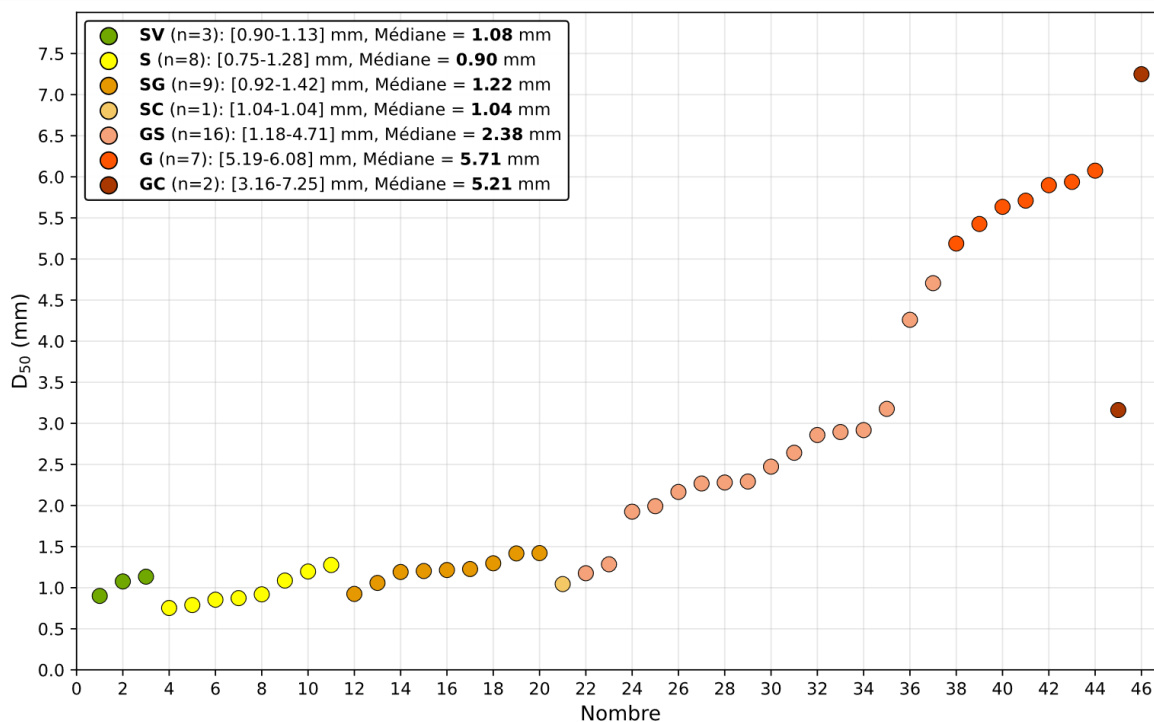


Figure 14. Diamètres médians (D_{50}) des grains mesurés dans les 46 échantillons sédimentaires prélevés dans la zone d'étude EMR BNO. Les couleurs indiquent les classes sédimentologiques des échantillons (faciès).

Les valeurs médianes de D_{50} , ont été utilisées pour calculer les statistiques de mise en mouvement des sédiments et caractériser les modes de transport (charriage et suspension) en fonction des forçages hydrodynamiques. Elles sont synthétisées dans le **Tableau 2** ci-dessous.

Tableau 2. Valeurs médianes du D_{50} (en mm) pour les différentes classes granulométriques identifiées dans la zone d'étude (**Figure 14**).

Type de sédiment	Abréviation	D_{50} (mm)
Sables et vases	SV	1,08
Sables	S	0,90
Sables et graviers	SG	1,22
Sables et cailloutis	SC	1,04
Graviers et sables	GS	2,38
Graviers	G	5,71
Graviers et cailloutis	GC	5,21

3.3 Calcul des seuils critiques de mise en mouvement des sédiments

En fonction des différentes classes granulométriques des sédiments présentes sur la zone d'étude, caractérisées par les sept diamètres médians (D_{50}) définis pour la zone BNO, les paramètres de mobilité adimensionnels (θ_{cr}), ont été déterminés afin d'établir par la suite les statistiques de mise en mouvement des sédiments.

Les formulations de Shields (1936) et Soulsby (1997) sont largement utilisées en sédimentologie pour estimer les seuils de mobilité des sédiments, comme illustré dans la **Figure 15**. Cette figure présente la relation entre le paramètre de mobilité de Shields et Soulsby (θ_{cr} , **Eq. 1**) et la taille de grain adimensionnelle (D^* , **Eq. 2**), extraite de Soulsby (1997).

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d} \quad (\text{Eq. 1})$$

avec, τ_{cr} : contrainte de cisaillement critique sur le fond (N/m^2), g : constante d'accélération gravitationnelle (9.81 m/s^2), ρ_s : masse volumique des sédiments (kg/m^3), ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3), d : diamètre des grains (m).

$$D^* = d \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 2})$$

avec, g : constante d'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$), s : densité relative ($s = \rho_s / \rho$) et ν : viscosité cinématique du fluide (m^2/s), d : diamètre des grains (m).

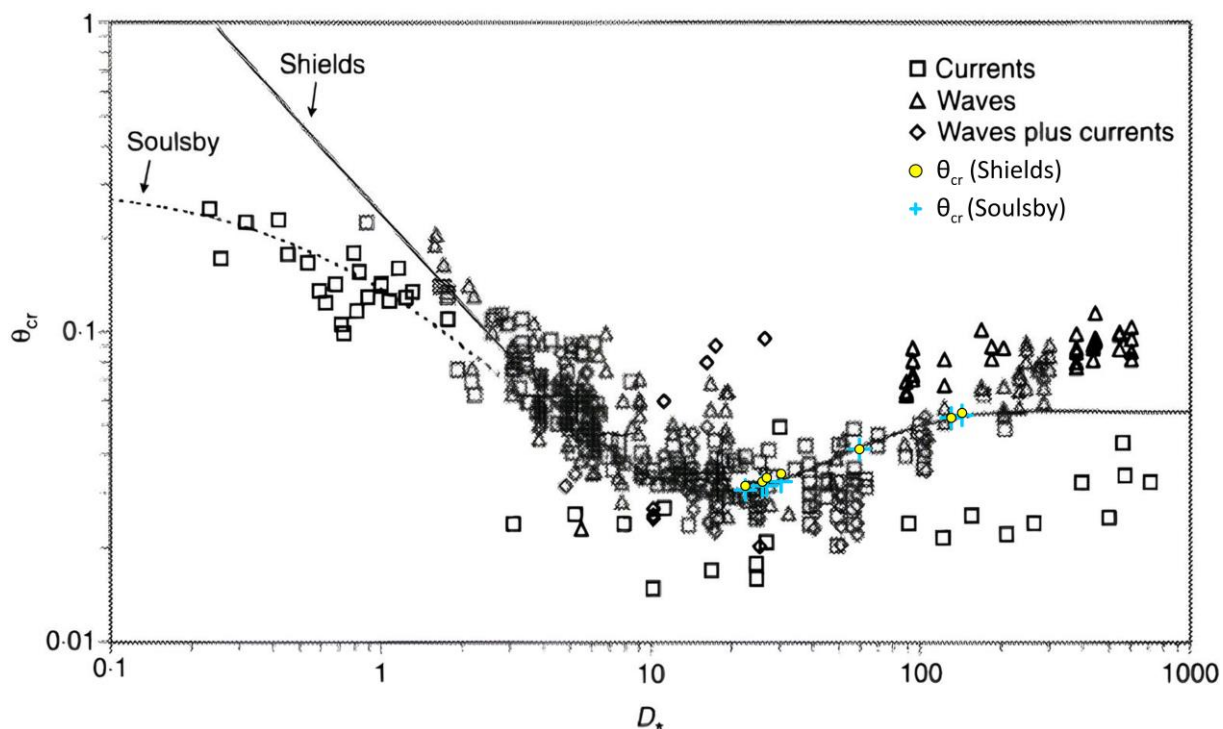


Figure 15. Paramètres critiques de Shields et Soulsby (θ_{cr}) en fonction du diamètre de grain adimensionnel (D^*), extrait de Soulsby (1997), modifiée. Les contraintes critiques de cisaillement calculées pour BNO sont représentées par des cercles jaunes (formulation de Shields) et des croix bleues (formulation de Soulsby).

Le **Tableau 3** et la **Figure 15** présente les diamètres médians (D_{50}) retenus pour cette étude, ainsi que les tailles de grains adimensionnelles (D^*), nécessaires pour le calcul des paramètres de mobilité selon les formulations de Shields (1936) et Soulsby (1997).

Les paramètres de mobilité (θ_{cr}) ont ainsi été calculés selon ces deux approches, et la méthode de Soulsby a été retenue. En effet, Soulsby (1997) propose une paramétrisation analytique continue du diagramme de Shields, particulièrement adaptée aux faibles valeurs de D^* (voir figure 13, courbe noire pointillée, notamment pour des valeurs de D^* faibles).

Tableau 3. Contraintes critiques de cisaillement (θ_{cr}) selon Shields (1936) et Soulsby (1997), et tailles de grains adimensionnelles (D^*), en fonction des sept D_{50} représentatifs des sédiments identifiés dans la zone BNO.

Classe sédimentaire	D_{50} (mm)	D^*	θ_{cr} (Shields)	θ_{cr} (Soulsby)
SV	0,90	22,465	0,032	0,031
S	1,04	25,960	0,033	0,032
SG	1,08	26,958	0,034	0,032
SC	1,22	30,453	0,035	0,033
GS	2,38	59,408	0,042	0,042
G	5,21	130,048	0,053	0,053
GC	5,71	142,529	0,055	0,054

3.4 Evaluation du mode de transport

Dans la présente étude, nous appliquons la méthodologie développée par Wu and Lin (2014) pour caractériser les types de transport sédimentaire sur la période 1980–2024. Le transport solide total (q_{total}) est estimé comme la somme des contributions respectives du charriage (q_b) et de la suspension (q_s), évaluées pour chaque classe granulométrique en fonction des conditions hydrodynamiques combinées des vagues et du courant.

Dans ce rapport, seules les équations relatives à la **suspension (Eq.3)** et au **charriage (Eq.4)** sont présentées. Ces formulations intègrent l'asymétrie des vagues à travers le calcul des contributions *onshore* et *offshore*. Toutefois, dans le cadre de la présente étude, cette asymétrie s'avère négligeable puisque la zone de BNO est située au large. Pour une présentation complète des équations, des hypothèses de modélisation et des paramètres utilisés, le lecteur est invité à consulter l'article original de Wu et Lin (2014).

$$q_s = 0.0000262 \sqrt{(s-1)gd_k^3} \left[\left(\frac{\tau_{suspension}}{\tau_{cri}} - 1 \right) \frac{U_c}{\omega_{sk}} \right]^{1.74} \quad (\text{Eq. 3})$$

avec, s : densité relative ($s = \rho_s / \rho$) (-), g : constante d'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$), d_k : diamètre des particules (m), k : varie de 1 à 7 et représente les sept classes granulométriques considérées, $\tau_{suspension}$: contrainte de cisaillement pour le transport en suspension (N.m^{-2}), τ_{cri} : contrainte critique de mise en mouvement (N.m^{-2}), U_c : vitesse moyenne du courant barotrope (m/s), ω_{sk} : vitesse de chute (ou de sédimentation) des particules (m.s^{-1}).

$$q_b = 0.0053 \sqrt{(s-1)gd_k^3} \left(\frac{\tau_{charriage}}{\tau_{cri}} - 1 \right)^{2.2} \quad (\text{Eq. 4})$$

avec, s : densité relative ($s = \rho_s / \rho$) (-), g : constante d'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$), d_k : diamètre des particules (m), k : varie de 1 à 7 et représente les sept classes granulométriques considérées (ici, $k = 1$), $\tau_{charriage}$: contrainte de cisaillement pour le transport par charriage (N.m^{-2}), τ_{cri} : contrainte critique de mise en mouvement (N.m^{-2}).

3.5 Résultats

3.5.1 Statistiques de mise en mouvement des sédiments

Cette section présente l'analyse de la mise en mouvement des sédiments dans la zone d'étude, synthétisée à travers la **Figure 16** et la **Figure 17** (dynamiques de mobilité) et le taux de transport (**Figure 18**).

3.5.1.1 Analyse du temps de mobilité des sédiments sous l'effet combiné des vagues et courants selon Soulsby (1997)

Cette sous-section présente le calcul des temps de mobilisation des sédiments en considérant l'action des vagues, des courants et de leurs effets combinés. Ces calculs sont réalisés pour les sept classes sédimentaires représentatives de la zone. Les résultats sont synthétisés dans la **Figure 16**. Les détails des analyses sont disponibles en **Annexes** (Point P1 : **Figure 32** à **Figure 45** ; Point P2 : **Figure 46** à **Figure 67** ; Point P3 : **Figure 68** à **Figure 74**).

Les calculs reposent sur un champ de courant issu d'une modélisation bidimensionnelle (2D), faute de disposer de données représentatives du courant au fond. Le rejeu HYWAT bénéficie de forçages en niveaux d'eau et courants (couplage offline) issus du modèle hydrodynamique HYCOM (Bleck, 2002), toutes les 12 minutes. Cette approche est susceptible

de surestimer l'intensité des vitesses réellement présentes à proximité du fond marin, alors que la contrainte de cisaillement responsable de la mobilisation sédimentaire dépend directement des conditions hydrodynamiques dans cette zone. Les temps de mobilisation estimés doivent ainsi être considérés comme des valeurs potentiellement majorantes.

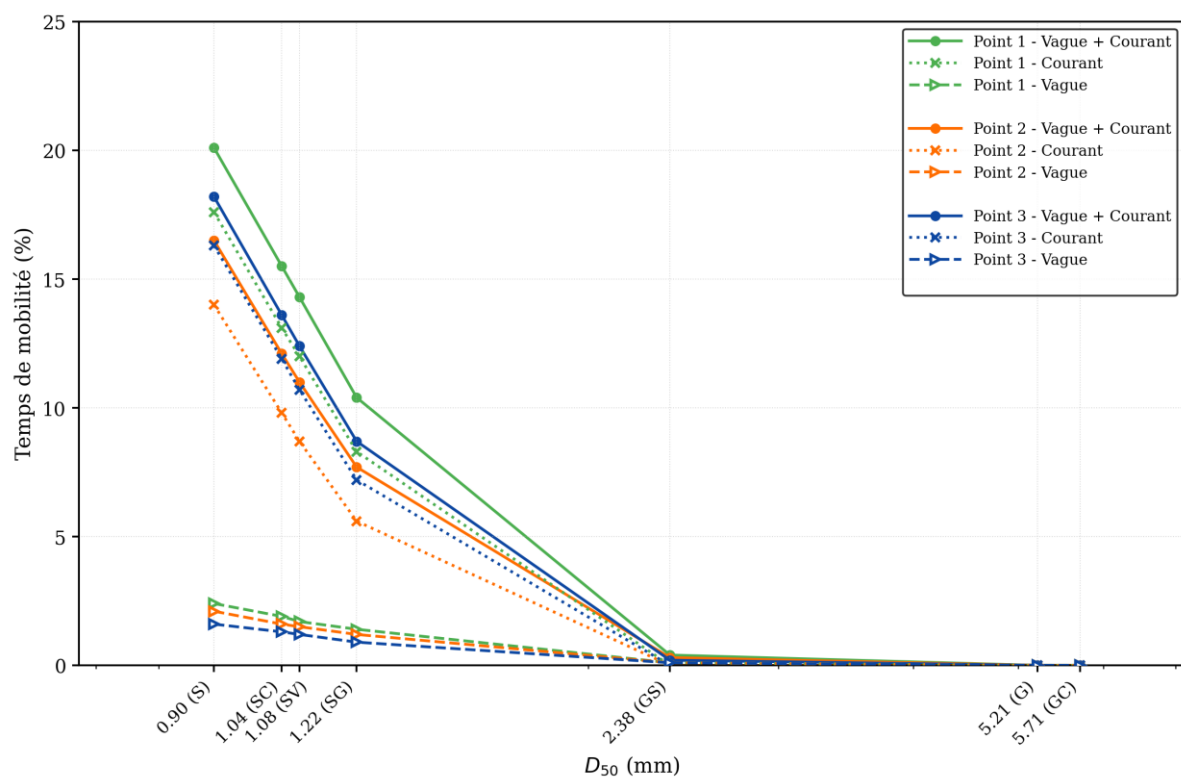


Figure 16. Proportion de temps (%) sur la période 1980-2024 durant laquelle le paramètre de Shields (θ) dépasse le seuil critique (θ_{cr}) de mise en mouvement, en fonction du D_{50} (échelle logarithmique) pour chaque point du rejeu HYWAT (P1, P2 et P3), selon l'action des vagues seules (triangles), du courant seul (croix) ou de la combinaison des deux (cercles).

Sur le plan spatial, les temps de mobilité les plus élevés sont observés au point P1 (le plus à l'est), suivi des points P3 et P2. Cela s'explique par la profondeur au point P1 qui est plus faible qu'aux points P2 et P3 (Figure 2).

L'analyse Figure 16 révèle une absence de mobilité significative des sédiments grossiers (GS, G, GC), qui couvrent environ 70 % de la surface du fond marin de la zone BNO. À l'inverse, les sédiments plus fins (SV, S, SC et SG), bien que faiblement représentés (27 % de la surface), sont potentiellement mobilisables lors d'événements extrêmes. Les 3 % restant de la surface sont de la roche du substratum affleurant qui n'est pas mobile.

De plus, les résultats révèlent que le courant de marée constitue le principal moteur du dépassement du seuil critique de mise en mouvement, tandis que la contribution des vagues demeure limitée et essentiellement associée aux épisodes très énergétiques, en particulier pour les classes granulométriques les plus fines. L'action du courant seul conduit ainsi à des niveaux de mobilisation comparables à ceux obtenus par l'action combinée des vagues et des courants.

Dans ce contexte, les sédiments les plus fins (SV, S, SC et SG) apparaissent suffisamment mobiles pour transiter au sein de la zone d'étude. Cependant, lors des épisodes de mortes eaux ou de conditions hydrodynamiques plus faibles, ces particules peuvent potentiellement se déposer localement, notamment par piégeage dans des dépressions. Enfin, la faible épaisseur sédimentaire observée dans la zone suggère un stock sédimentaire limité.

3.5.1.2 Analyse du temps de mobilité des sédiments par charriage ou suspension selon Wu & Lin (2014)

Cette sous-section détaille le temps de dépassement des seuils critiques des contraintes en charriage et en suspension pour les différentes classes granulométriques (D_{50}). Les résultats sont synthétisés dans la **Figure 17**. Les détails des analyses sont disponibles en **Annexes** (Point P1 : **Figure 32** à **Figure 45** ; Point P2 : **Figure 46** à **Figure 67** ; Point P3 : **Figure 68** à **Figure 74**).

Les résultats présentés sur la **Figure 17** montrent une diminution du temps de mobilité des sédiments avec l'augmentation du diamètre médian D_{50} . Seuls les sédiments les plus fins (S, SV, SC, SG) présent sur 27 % de la surface du fond, présentent des temps de mobilité compris entre 1 et 6 % du temps. Pour ces classes granulométriques, le transport s'effectue davantage par suspension, le charriage restant systématiquement inférieur.

Dans la continuité de cette tendance, le faciès GS ($D_{50} = 2,38$ mm), dominant dans la zone BNO avec environ 50 % de la surface du fond, présente des temps de mobilité quasi nuls, inférieurs à 0,2 %, aussi bien pour la suspension que pour le charriage, et ce quel que soit le point considéré. Cette faible mobilisation pourrait se produire lors d'évènements hydrodynamiques extrêmes, tels que des tempêtes importantes, des marées exceptionnelles, ou la combinaison simultanée de ces deux facteurs. Les faciès encore plus grossiers G ($D_{50} = 5,71$ mm ; 14 % de la surface) et GC ($D_{50} = 5,21$ mm ; 6 % de la surface), ne montrent aucune mobilisation sur la période étudiée, les seuils critiques n'étant jamais atteints.

Sur le plan spatial la **Figure 17** montre que la mobilité sédimentaire diffère très peu entre les trois points étudiés (P1, P2 et P3). Le point P1 présente des temps de mobilité légèrement supérieurs à ceux des points P2 et P3, en particulier pour les sédiments les plus fins. Cette tendance, bien que minime, reflète une exposition hydrodynamique légèrement plus marquée à l'est, caractérisée des profondeurs plus faibles.

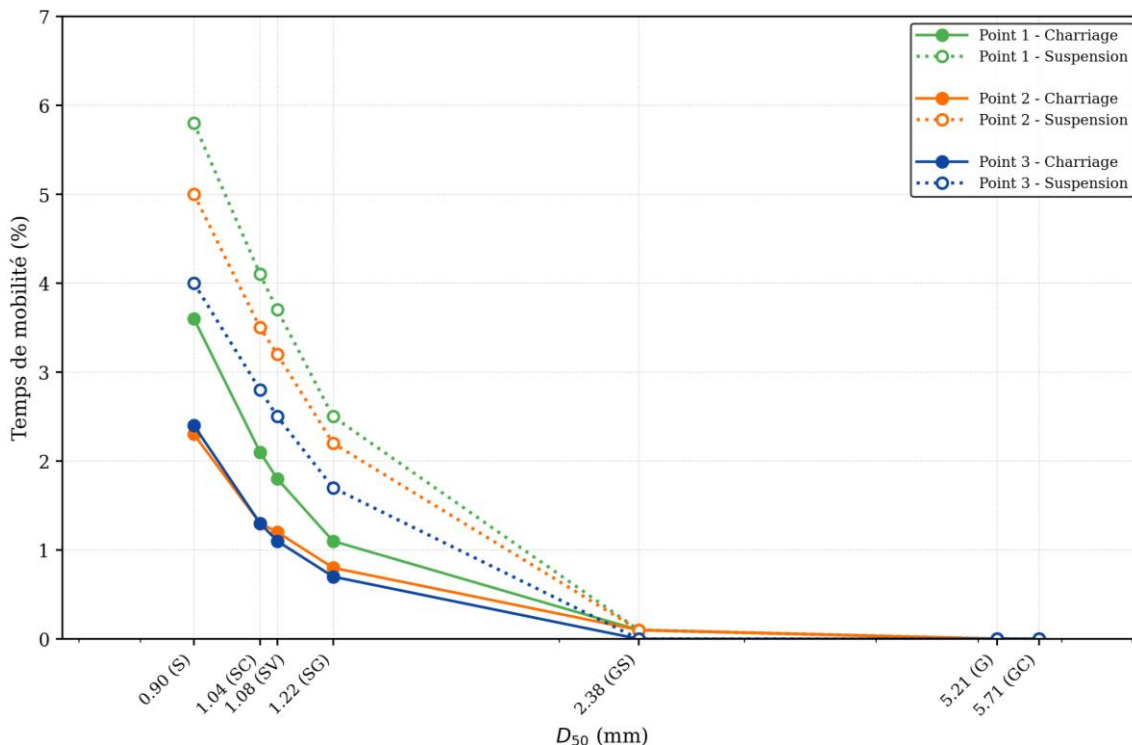


Figure 17. Proportion du temps (en %) durant laquelle le seuil critique de la contrainte, en charriage ou en suspension, est dépassé sur la période 1980-2024, en fonction du D_{50} (échelle logarithmique). Les données sont calculées sur chaque point du rejeu HYWAT (P1, P2 et P3).

L'analyse des modes de transport est cohérente avec l'analyse des temps de mobilité sous l'influence des courants/vagues. Sur la période analysées (1980–2024), la zone BNO présente une mobilité sédimentaire globalement très faible, décroissante avec l'augmentation du diamètre médian D_{50} . La mise en mouvement concerne principalement les fractions fines (S, SV, SC et SG), représentant environ 27 % de la surface du fond, avec une prédominance du transport en suspension et des temps de mobilité limités. À l'inverse, les faciès grossiers, représentant 70 % de la surface du fond (dominés par le faciès GS) atteignent rarement les seuils critiques de mise en mouvement, traduisant une stabilité du fond. Les 3 % restant de la surface sont de la roche qui n'est pas mobilisable.

3.5.2 Evaluation du transport solide

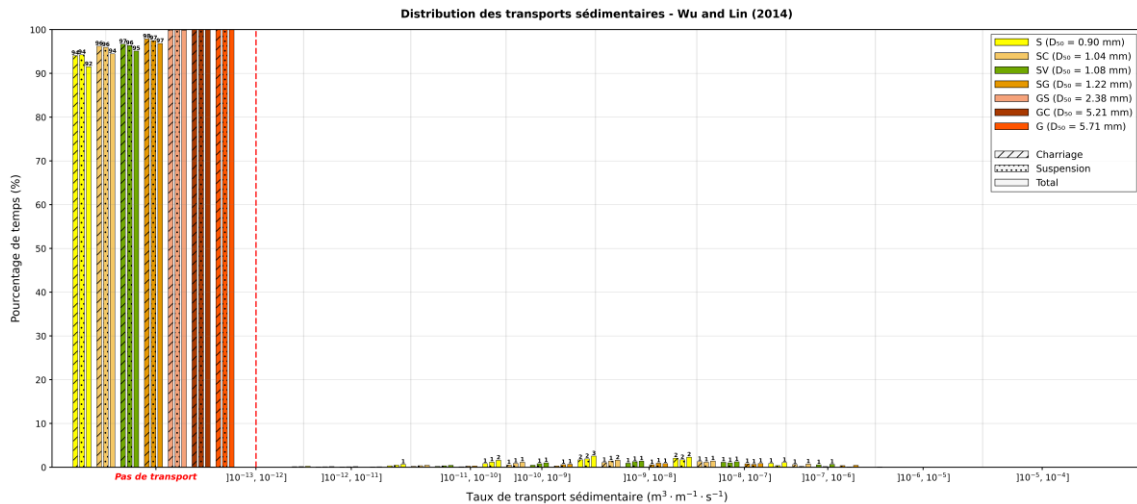
Cette section présente l'analyse des transports sédimentaires sur la période 1980–2024 pour les trois points du rejeu HYWAT sélectionnés. Les détails des analyses sont disponibles en **Annexes (Point P1 : Figure 39 à Figure 44 ; Point P2 : Figure 61 à Figure 66 ; Point P3 : Figure 83 à Figure 88)**.

L'objectif est d'évaluer le transport total (q_{total}) sous l'influence conjointe des vagues et du courant, en fonction de la taille des particules sédimentaires. L'approche adoptée permet de distinguer les contributions du transport par charriage (q_b) et du transport en suspension (q_s). Les taux de transport calculés correspondent à des flux volumétriques. Ainsi ils expriment un volume de grains (m^3) transporté par unité de temps (s) et par unité de longueur horizontale (m^{-1}), ce qui donne des $m^3.m^{-1}.s^{-1}$.

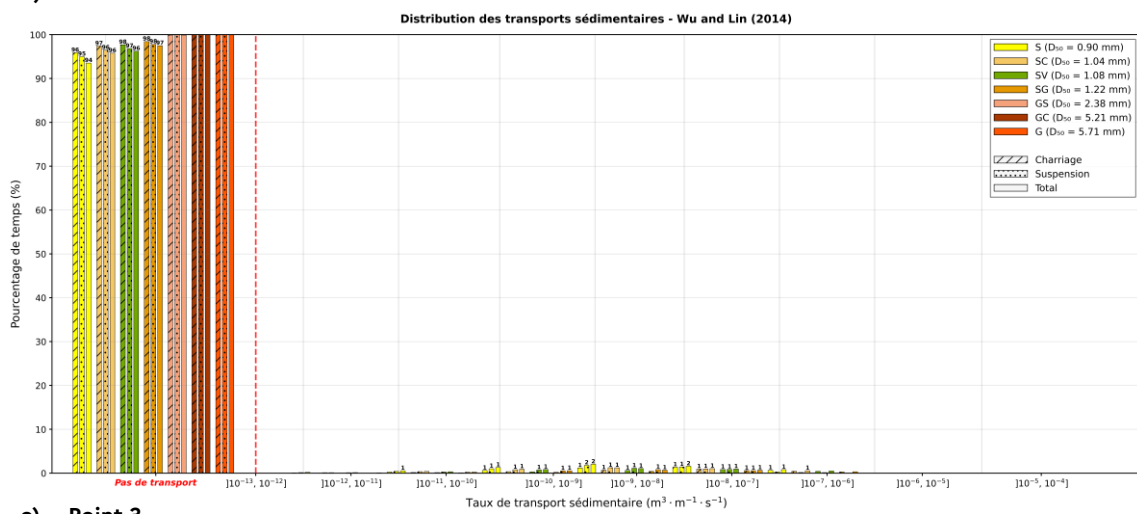
Les taux de transport sédimentaire ont été calculés selon la formule de Wu et Lin (2014) pour les sept classes granulométriques considérées, allant des sables (S, $D_{50} = 0,9$ mm) aux cailloutis graveleux (GC, $D_{50} = 5,21$ mm), et aux trois points d'observation (P1 : **Figure 18.a**, P2 : **Figure 18.b** et P3 : **Figure 18.c**). La **Figure 18** présente :

- Le pourcentage de temps sans transport (à gauche de la ligne rouge en pointillé) ;
- Le pourcentage de temps avec transport (à droite de la ligne rouge en pointillé) ;
- Les taux de transport sous forme d'intervalles de valeurs exponentielles, en considérant que le transport débute à $10^{-13} m^3.m^{-1}.s^{-1}$.

Sur les trois points étudiés (P1, P2 et P3), le transport sédimentaire total est quasi inexistant pendant plus de 92 % du temps (S) à 98 % du temps (GS). Les fractions les plus grossières (GS, G, GC) ne présentent aucun transport significatif sur l'ensemble de la période d'observation (< 1 %), ce qui est cohérent avec les seuils critiques élevés nécessaires à leur mise en mouvement. Pour le faible pourcentage de temps où le transport est possible, les intensités de transport restent très faibles (< $10^{-6} m^3.m^{-1}.s^{-1}$).



b) Point 2



c) Point 3

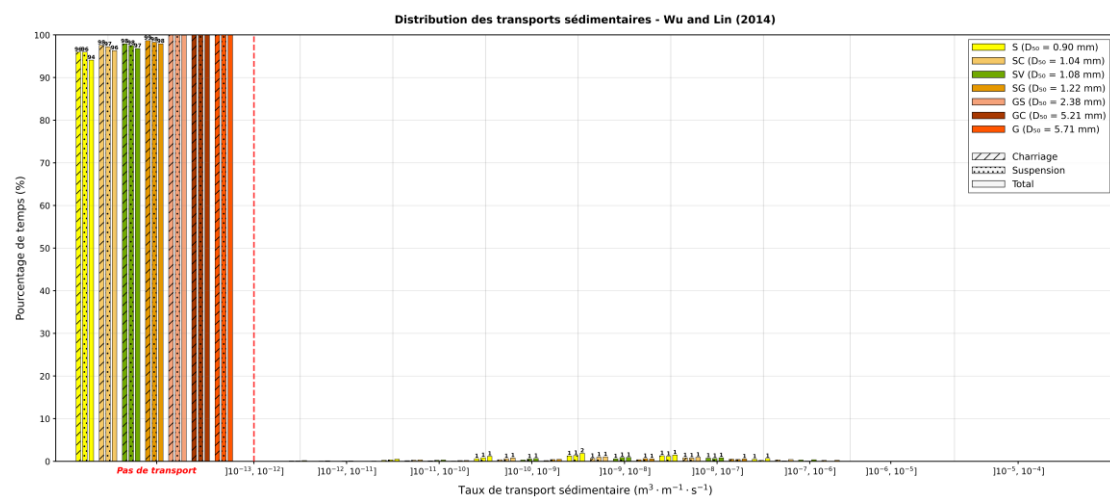


Figure 18. Pourcentage de temps de mobilité et du taux de transport sédimentaire selon les intervalles d'ordre de grandeur considérés, soit une échelle exponentielle (à partir de 10^{-13}) a. Point 1, b. Point 2 et c. Point 3. Les lignes rouges en pointillés marquent la limite entre la zone avec transport (droite) et sans transport (gauche).

4. Analyse des morphologies sédimentaires potentiellement dynamiques

4.1 Matériels et méthodes

Les levés bathymétriques disponibles couvrent une période étendue de 1929 à 2025 et reflètent l'évolution progressive des techniques d'acquisition. Donc, la densité des mesures (**Figure 19**), la précision des instruments et la résolution (**Tableau 4**) sont différentes selon les années. Cette diversité constitue un élément important à considérer dans l'analyse des évolutions morphologiques de la zone étudiée.

L'analyse des différentiels bathymétriques entre le levé le plus récent (2025) et l'ensemble des 13 levés antérieurs réalisés entre 1929 et 2025 (**Tableau 4**), a été effectuée en tenant compte, pour chaque comparaison, de l'incertitude verticale totale associée (**Tableau 5**) comprise entre ± 1 m et ± 5 m selon les levés considérés (**Figure 21**). Les levés récents présentant généralement des incertitudes plus faibles que les levés anciens grâce aux progrès des techniques d'acquisition. Les différentiels de profondeur Δz (m) sont calculés comme la différence entre le levé de 2025, considéré comme référence, et chacun des levés bathymétriques antérieurs (**Figure 21**).

Les deux levés de 1931 ont été fusionnés, de même que les trois levés de 1973 et les trois levés de 2012 (**Tableau 4** et **Tableau 5**). Cette fusion a été réalisée lorsque les acquisitions étaient proches dans le temps et reposaient sur des méthodes de mesure comparables, garantissant ainsi une cohérence spatiale et méthodologique des données. Ce regroupement vise à limiter les biais liés à la multiplication de levés similaires tout en conservant la représentativité des informations bathymétriques. Les éventuelles incertitudes associées à cette approche sont discutées dans la section dédiée (**section 4.2**).

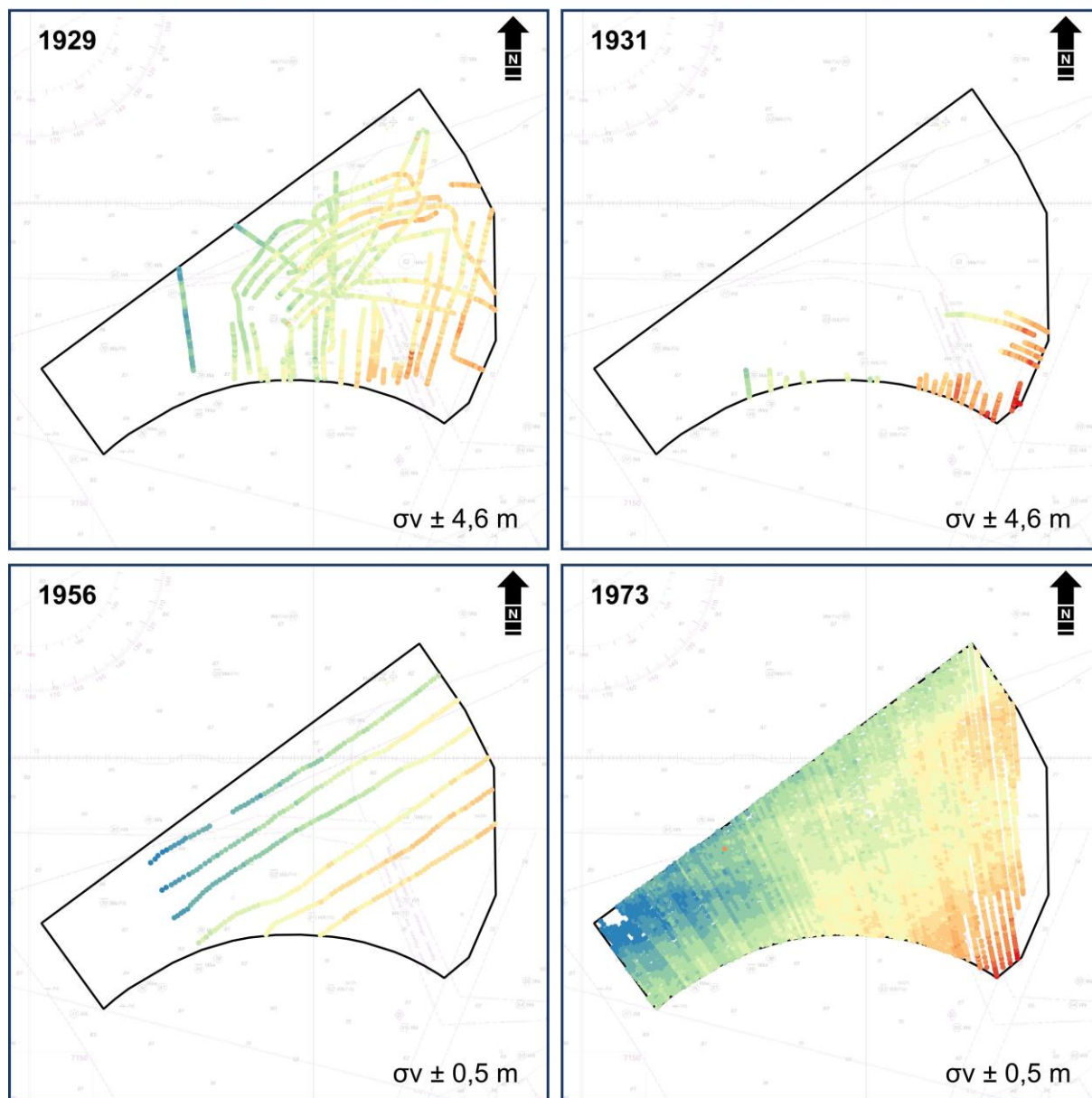
Tableau 4. Paramètres techniques des quatorze levés bathymétriques effectués entre 1929 et 2025 recoupant la zone EMR BNO.

Nom du levé *	Année du levé	Type de donnée	Résolution spatiale approximative (m)	Matériel utilisé	Modèle du sondeur	Nom des porteurs
S192900600-010	1929	Ponctuel	~ 150	Sondeur ultrasons	?	BH l'Utile
S193100200-006	1931	Ponctuel	~ 100	Sondeur ultrasons	?	BH l'Utile
S193100200-007	1931	Ponctuel	~ 100	Sondeur ultrasons	?	BH l'Utile
S195600500-001	1956	Ponctuel	~ 300	Sondeur monofaisceau	KELVIN-HUGHES	EST ESTAFETTE
S197300800-011	1973	Ponctuel	~ 150	Sondeur monofaisceau	DESO 10	EST ESTAFETTE
S197300800-012	1973	Ponctuel	~ 150	Sondeur monofaisceau	DESO 10	BH L'Astrolabe
S197300800-013	1973	Ponctuel	~ 150	Sondeur monofaisceau	DESO 10	BH L'Astrolabe
S199404900-001	1999	Ponctuel	~ 30	Sondeur monofaisceau	DESO 20	BH L'Astrolabe
S200902800-3	2009	Ponctuel	~ 15	Sondeur multifaisceaux	RESON 7111	BH2c Lapérouse + BH2c Borda
S201108200-002	2011	Ponctuel	~ 10	Sondeur multifaisceaux	Simrad EM1002	Pourquoi-Pas
S201206500-1	2012	Ponctuel	~ 10	Sondeur multifaisceaux	Simrad EM1002	Pourquoi-Pas ? + BHO Beautemps-Beaupré
S201206500-2	2012	Ponctuel	~ 10	Sondeur multifaisceaux	Simrad EM1002	BH2c Borda
S201203300-003	2012	Ponctuel	~ 10	Sondeur multifaisceaux	Simrad EM1002	BH2c Borda
S202501700-001	2025	Modèle numérique de terrain (MNT)	~ 2	Sondeur multifaisceaux	Simrad EM710	BHO Beautemps-Beaupré

* Le nommage des bathymétries historiques reprend la référence du lot dans la Base de Données Bathymétrique du Shom (BDDBS) avec « S » pour le levé Shom, suivi de l'année d'enregistrement et du numéro d'ordre du levé dans l'année d'enregistrement.

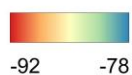
Sondes bathymétriques historiques dans la zone EMR Bretagne Nord-Ouest (1)

Projection : WGS84 / World Mercator (EPSG : 3395)



Légende

- Emprise de la zone EMR
- Sondes bathymétriques historiques (profondeur en m)



Sources

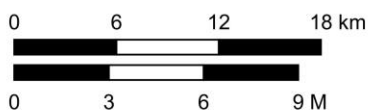
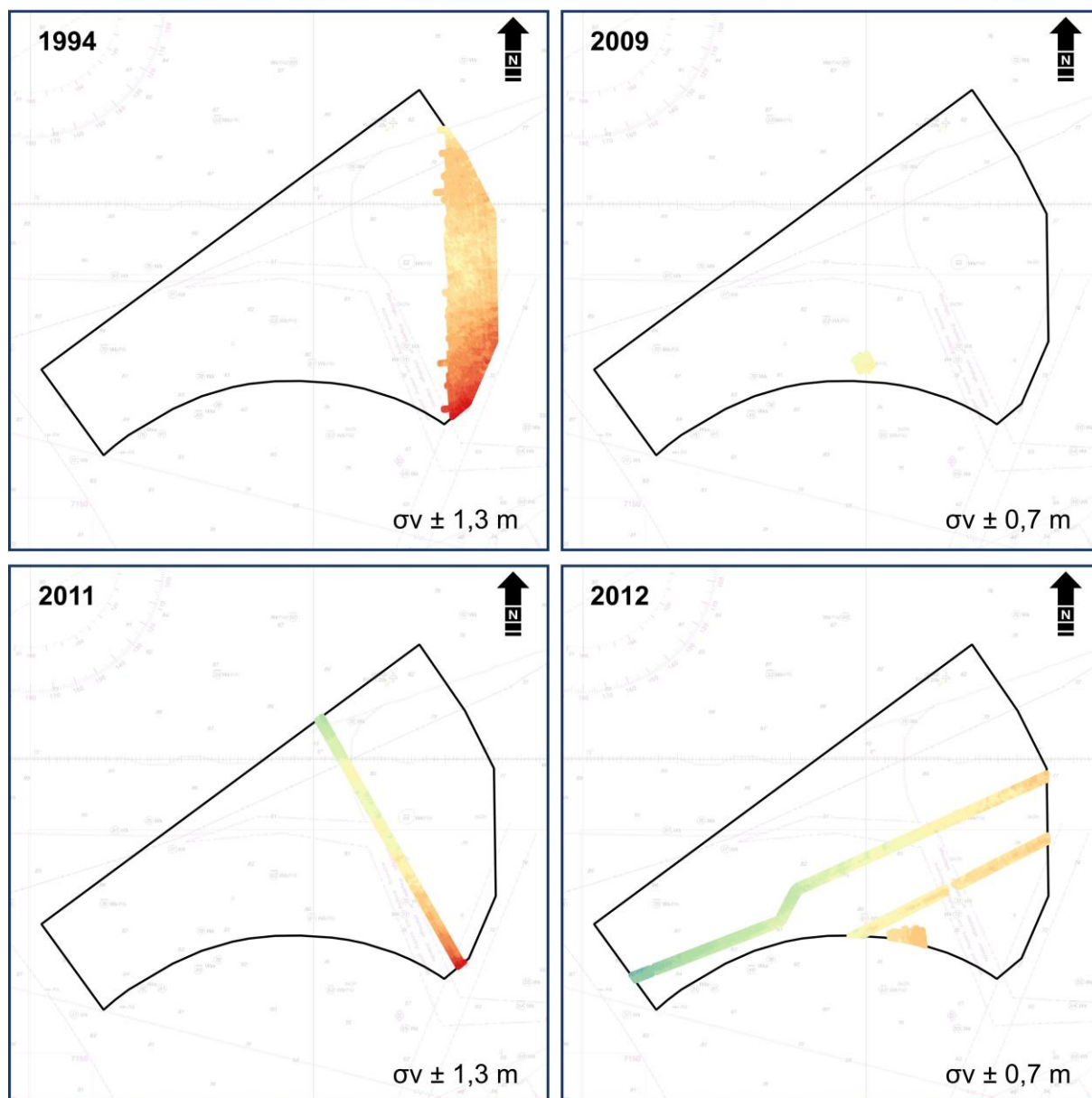
DGEC : limites de la zone EMR
 Shom : sondes bathymétriques historiques, carte marine 6930

Réalisation : Shom - Mars 2026

Figure 19. Sondes bathymétriques historiques (points colorés selon la profondeur), acquises entre 1929 et 1973 dans la zone EMR BNO. L'incertitude verticale du levé est exprimée par le σ_v .

Sondes bathymétriques historiques dans la zone EMR Bretagne Nord-Ouest (2)

Projection : WGS84 / World Mercator (EPSG : 3395)



Sources

DGEC : limites de la zone EMR
 Shom : sondes bathymétriques historiques, carte marine 6930

Légende

- Emprise de la zone EMR
 - Sondes bathymétriques historiques (profondeur en m)
- 92 -78

Réalisation : Shom - Mars 2026

Figure 20. Sondes bathymétries historiques (points colorés selon la profondeur), acquises entre 1994 et 2012 dans la zone EMR BNO. L'incertitude verticale du levé est exprimée par le σ_v .

4.2 Incertitudes des levés bathymétriques

Afin de déterminer s'il y a eu des évolutions bathymétriques significatives sur la période d'environ 96 ans séparant les différents levés, les variations verticales ont été évaluées point par point, avec la méthode des plus proches voisins pour chaque levé.

Les sondes anciennes, acquises au sondeur monofaisceau et matérialisées par des entités ponctuelles, sont superposées au MNT récent. Ce MNT a été calculé à partir d'une densité de sondes beaucoup plus importante acquises au sondeur multifaisceaux, et est représentatif de l'état actuel. Par conséquent, il est utilisé comme référence pour évaluer une différence ($Z_{\text{récent}} - Z_{\text{anciens}}$). Pour cette étude, la référence est le MNT bathymétrique de 2025.

Seules les variations de profondeur dépassant le seuil d'incertitude verticale cumulée des levés sont considérées comme significatives. Ainsi, afin d'évaluer la fiabilité des écarts observés entre les levés et de distinguer les évolutions réelles du fond marin des artefacts de mesure, il est nécessaire d'identifier et d'essayer de quantifier les principales sources d'incertitude associées aux levés bathymétriques. Ces incertitudes peuvent être regroupées selon les catégories suivantes :

- **Incertainces liées aux mouvements des bateaux** : bien que les centrales inertielles et le GPS aient amélioré la précision depuis les années 1990, les effets résiduels de roulis, tangage et cap entraînent des décalages verticaux d'environ 10 à 50 cm, notamment entre fauchées successives.
- **Incertainces liées à l'acquisition et à la représentation des données** : les levés ponctuels, sont biaisés et peu représentatifs. Les erreurs de marée (souvent dérivées de ports éloignés) peuvent atteindre 0,5 à 1 m, et les imprécisions de positionnement ou de transcription cartographique ajoutent d'autres biais.
- **Erreurs sur les réductions de sonde** : les levés récents (par ex. SMF 2020) ont souvent été réduits à partir de la marée prédite sans correction des surcotes/décotes liées à la pression atmosphérique, au vent ou à la température, générant des écarts pouvant atteindre 60 à 90 cm, soit une incertitude totale pouvant aller jusqu'à 1 m.
- **Biais liés à la comparaison mono/multifaisceau** : la comparaison entre des levés anciens réalisés au sondeur monofaisceau et des levés récents effectués au sondeur multifaisceaux peut induire un biais vertical de plusieurs centimètres. En effet, le faisceau acoustique multifaisceau pénètre légèrement dans les sédiments, d'autant plus que ceux-ci sont fins, tandis que le monofaisceau enregistre généralement la réflexion sur la surface du fond quel que soit le type de sédiment. Cette différence de comportement acoustique peut donc créer une incertitude verticale entre les deux types de levés considérés de l'ordre d'une dizaine de centimètres.
- **Incertainces sur les références verticales** : les anciens levés utilisent des zéros hydrographiques différents, parfois non documentés. Leur homogénéisation au 0 NGF-IGN69 introduit une incertitude de l'ordre de 10 à 50 cm.
- **Incertainces liées au positionnement horizontal** : les levés anciens peuvent présenter une incertitude horizontale d'environ 50 m. Dans les zones caractérisées par un fort gradient bathymétrique, comme les zones avec des pentes, un décalage horizontal de cette amplitude peut engendrer des écarts significatifs dans les valeurs de profondeur mesurées verticalement.

Les incertitudes verticales et horizontales associées à chaque différentiel ont été estimées en cumulant les incertitudes verticales propres à chacun des levés considérés (**Tableau 5**). Dans le cas des différentiels bathymétriques, l'incertitude verticale correspond à une valeur seuil,

positive ou négative, au-delà de laquelle les variations de la bathymétrie peuvent être interprétées comme significatives.

Tableau 5. Synthèse des incertitudes verticales et horizontales – Les valeurs des incertitudes représentent l'addition des incertitudes des deux levés.

Levés comparés	Années des levés (Levé récent – Levé ancien)	Incertitude horizontale totale (m)	Incertitude verticale totale $\sigma_{V_{totale}}$ (m)
S202501700 - S192900600-010	2025 - 1929	± 160	± 5,15
S202501700 – levés 1931 *	2025 - 1931	± 82	± 5,15
S202501700 - S195600500-001	2025 - 1956	± 302	± 3,00
S202501700 – levés 1973 *	2025 - 1973	± 100	± 2,50
S202501700 - S199404900-001	2025 - 1994	± 12	± 1,78
S202501700 - S200902800-3	2025 - 2009	± 7	± 1,20
S202501700 - S201108200-002	2025 - 2011	± 4	± 1,78
S202501700 – levés 2012 *	2025 - 2012	± 4	± 0,94

* Les deux levés de 1931 ont été fusionnés, de même que les trois levés de 1973 et les trois levés de 2012 (voir **Tableau 4**).

4.3 Résultats

La médiane et la moyenne de l'ensemble des valeurs des différentiels (Δz) sont respectivement de 0,03 m ± 0,38 m et de -0,02 m ± 0,38 m. Ces valeurs, très proches de zéro mètre, indiquent que les variations verticales du fond marin apparaissent globalement faibles sur la période 1929–2025, suggérant une stabilité relative de la bathymétrie dans la zone d'étude.

Cependant, ces différentiels moyens restent inclus dans l'enveloppe d'incertitude associée aux mesures (**Figure 21** à **Figure 23**). À cela s'ajoutent des contraintes importantes liées au jeu de données : recouvrement limité entre les levés historiques, densités de points variables et souvent faibles, ainsi que des écarts temporels marqués entre les levés. Ces facteurs réduisent la capacité à détecter des variations bathymétriques fines et rendent complexe toute conclusion définitive sur l'évolution réelle du fond marin.

Dans ce contexte, bien que l'évolution temporelle des moyennes de Δz suggère une alternance de phases d'érosion (de 1929 à 1973) et d'accrétion (de 1973 à 2025) (ligne noire en pointillés **Figure 21**), cette interprétation doit être considérée avec prudence. Les variations estimées demeurent inférieures au mètre et sont du même ordre de grandeur que les incertitudes de mesure, ce qui ne permet pas d'affirmer de manière robuste l'existence de dynamiques sédimentaires mesurables à partir des données disponibles.

La comparaison entre les levés 2025 et 1973, met en évidence une variation verticale du fond de + 8 m. Elle est localisée au niveau d'une épave répertoriée sur la carte marine (6930, Shom, 2025). La détection de cet évènement confirme que la méthode est capable de mettre en évidence des variations bathymétriques importantes lorsqu'elles existent, ce qui renforce l'interprétation selon laquelle l'absence de signal significatif ailleurs traduit vraisemblablement une stabilité relative du fond à l'échelle étudiée.

Concernant la comparaison des levés 2025/1956, un écart-type plus élevé est observé, indiquant une érosion sur les trois profils situés au nord-ouest de la zone (~ -3 m). Cependant, la faible résolution des points sondés du levé de 1956 (**Tableau 4**) ne permet pas de tirer de

conclusion définitive, d'autant plus que ce phénomène n'est pas observé pour les autres différentiels.

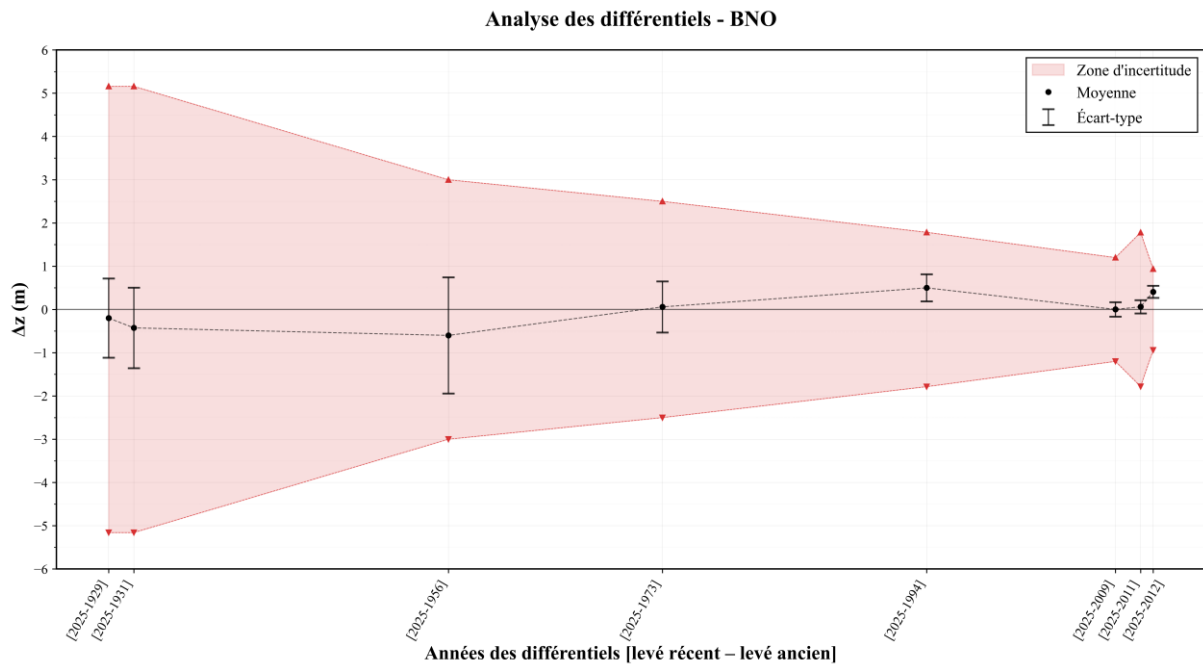
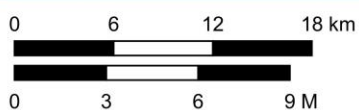
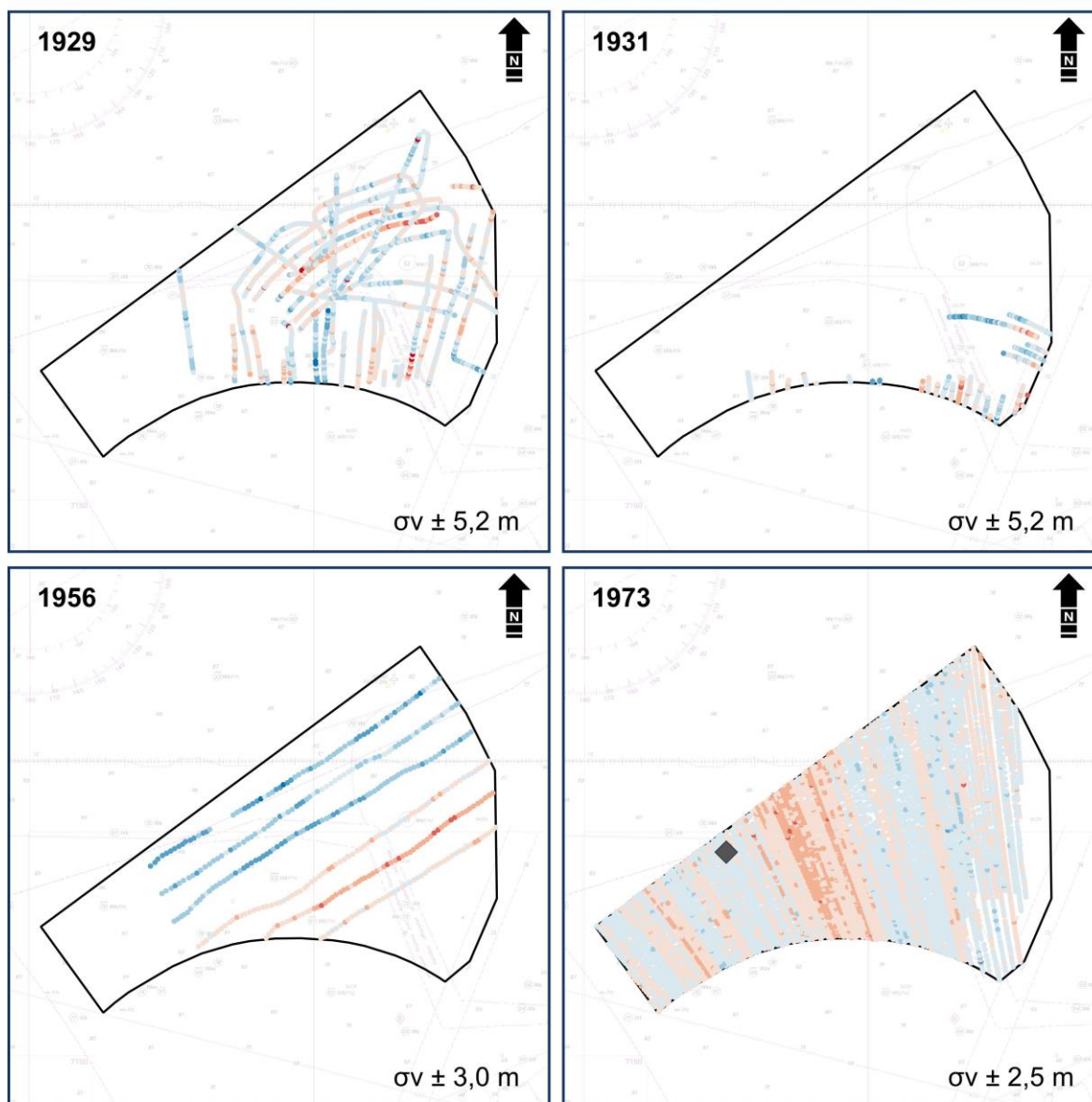


Figure 21. Variabilité temporelle des différentiels bathymétriques dans la zone BNO. Les points noirs aux valeurs moyennes des différentiels (Δz), tandis que les barres d'erreur indiquent l'écart-type associé. La zone rouge ombrée correspond à l'enveloppe d'incertitude verticale totale (σ_{totale}), centrée sur zéro, dont les bornes supérieure et inférieure matérialisées par des lignes rouges. La ligne horizontale noire correspond au niveau de référence $\Delta z = 0$, atteinte s'il n'y a aucune différence bathymétrique entre le levé récent de 2025 et le levé ancien considéré.

Différentiels bathymétriques entre 2025 les levés historiques dans la zone EMR Bretagne Nord-Ouest (1)

Projection : WGS84 / World Mercator (EPSG : 3395)



Légende

□ Emprise de la zone EMR

Différentiels bathymétriques (m)

- [-4 ; -3] ● [-2 ; -1] ● [0 ; 1] ● [2 ; 3] ◆ + 9 m (épave)
- [-3 ; -2] ● [-1 ; 0] ● [1 ; 2] ● [3 ; 5]

Sources

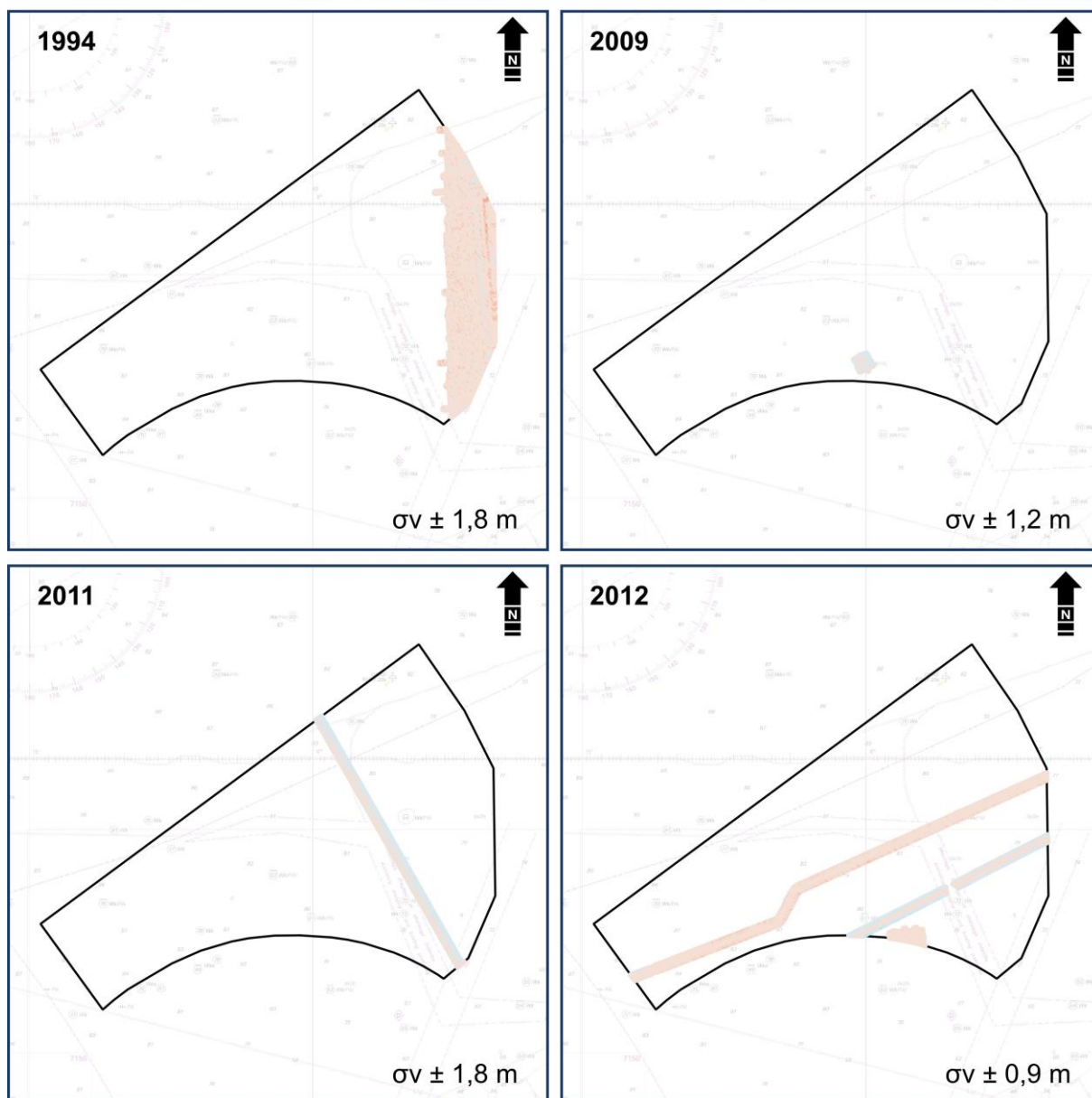
DGEC : limites de la zone EMR
Shom : différentiels bathymétriques, carte marine 6930

Réalisation : Shom - Mars 2026

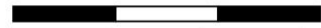
Figure 22. Différentiel bathymétrique dans la zone d'étude BNO pour les levés de 1929 à 1973 comparés au levé 2025. Les variations bathymétriques sont représentées par des cercles colorés selon l'intervalle considéré. Les valeurs comprises dans l'intervalle d'incertitude verticale σ_v ne sont pas interprétables. Le point rouge sur le différentiel [2025 – 1973] (en bas à droite) est associé au naufrage d'un bateau survenu en 1973 ou antérieurement.

Différentiels bathymétriques entre 2025 les levés historiques dans la zone EMR Bretagne Nord-Ouest (2)

Projection : WGS84 / World Mercator (EPSG : 3395)



0 6 12 18 km



0 3 6 9 M

Légende

Emprise de la zone EMR

Différentiels bathymétriques

- [-4 ; -3] ● [-2 ; -1] ● [0 ; 1] ● [2 ; 3]
- [-3 ; -2] ● [-1 ; 0] ● [1 ; 2] ● [3 ; 5]

Sources

DGEC : limites de la zone EMR
Shom : différentiels bathymétriques, carte marine 6930

Réalisation : Shom - Mars 2026

Figure 23. Différentiel bathymétrique dans la zone d'étude BNO pour les levés de 1994 à 2012 comparés au levé 2025. Les variations bathymétriques sont représentées par des cercles colorés selon l'intervalle considéré. Les valeurs comprises dans l'intervalle d'incertitude verticale σ_v ne sont pas interprétables.

5. Conclusion

L'étude menée sur la zone EMR « Bretagne Nord-Ouest » (BNO) met en évidence une dynamique sédimentaire globalement faible. En effet, les temps de mobilité des sédiments estimés ainsi que les taux de transport associés apparaissent très faibles, voire négligeables, à l'échelle de la zone d'étude.

La granulométrie des sédiments composant le fond, associée à des profondeurs relativement importantes et à des conditions hydrodynamiques limitées, apparaît comme le principal facteur expliquant cette faible mobilité. Il en ressort une prépondérance de sédiments grossiers (ici, $D_{50} > 2,38$ mm) non mobilisables, tandis que les sédiments plus fins, minoritaires dans la zone, ne peuvent être mobilisés que ponctuellement lors d'événements hydrodynamiques énergétiques isolés.

Dans les rares conditions susceptibles de mobiliser certaines classes granulométriques, les analyses montrent que les courants de marée constituent le principal forçage permettant le dépassement des seuils critiques de mise en mouvement, en particulier pour les grains les plus fins. Cette tendance a toutefois été établie à partir d'un courant 2D barotrope, qui ne rend pas pleinement compte de l'atténuation du courant dans la couche limite de fond, ce qui constitue une limite conservatrice tendant à surestimer les taux de mobilité estimés. L'influence des vagues reste, quant à elle, épisodique et limitée aux conditions hydrodynamiques les plus énergétiques. Le transport sédimentaire s'effectue à la fois par charriage et par suspension, avec une légère prévalence du transport en suspension. Néanmoins, les taux de transport estimés confirment une dynamique sédimentaire de très faible intensité, fortement liée à la taille des particules dans la zone. Quelques événements extrêmes restent ponctuellement susceptibles d'initier la mobilisation des classes sédimentaires les plus fines.

Cette faible dynamique sédimentaire est cohérente avec l'analyse des différentiels bathymétriques. En effet, la comparaison entre le levé récent réalisé en 2025 et les levés historiques disponibles dans la zone depuis 1929 ne met pas en évidence de variations significatives du fond marin au cours du siècle passé. Les valeurs moyennes de variation verticale du fond restent comprises entre -1 m et $+1$ m, traduisant une faible variabilité bathymétrique tant sur le plan spatial que temporel. Ces valeurs s'inscrivent en outre largement dans les intervalles d'incertitude inhérents aux acquisitions successives, liés notamment à l'évolution des méthodes et du matériel au cours du siècle passé, ce qui rend délicate l'appréhension fine de la mobilité des structures sédimentaires à partir de ces données.

Dans les conditions actuelles, la zone de Bretagne Nord-Ouest se caractérise ainsi par une stabilité morphologique dominante, avec une absence de mobilité des sédiments grossiers et une mobilité limitée, ponctuelle et transitoire des fractions les plus fines lors d'événements hydrodynamiques énergétiques.

6. Bibliographie

- Ismaili, M., Serve, L., Gadel, F., Lafite, R., Texier, H., 1999.** Biogeochemical markers of organic matter along the Wight-Cherbourg transect (central English Channel). *Oceanologica Acta* 22 (4), 397 – 412.
- Jourdan, D., Paradis, D., Pasquet, A., Michaud, H., Baraille, R., & Biscara, L. (2020).** La phase-3 du projet HOMONIM : définition et contenu. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.087>.
- Lafite, R., Shimwell, S., Nash, L., Dupont, J., Huault, M., Grochowski, N., Lamboy, M., Collins, M., 1992.** Sub-Task S1: Suspended material fluxes through the Strait of Dover. FLUXMANCHE Second Annual Progress Report, MAST OO53, 85–88.
- Le Hir, P. (2008).** Aide-mémoire de dynamique sédimentaire. Paris : Éditions Dunod.
- Michaud H., Seyfried L., Pasquet A., Leckler F., Lopez G., Leballeur L., Brosse F., Krien Y., Pezerat M., Faidherbe T., 2024.** *HYWAT : 45 ans de rejeux de marée, surcote et états de mer à haute résolution sur les côtes françaises atlantiques. Application aux risques de submersion côtière à Saint Malo.* XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Anglet, 25 juin 2024.
- Rivier A., 2013.** Thèse, Dynamique des matières en suspension minérales des eaux de surface de la Manche observée par satellite et modélisée numériquement.
- Shom (2025),** DECI - Rapport Bathymétrie, T1.B3_RAP_A3.
- Shom (2025),** DECI - Rapport Houle, T1.H_RAP.
- Shom (2025),** DECI - Rapport Marée, T1.M3_RAP.
- Shom (2025),** DEF - Rapport Sédimentologie, T4.S4_Sedimentologie_RAP.
- Shields, A. (1936).** Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. California Institute of Technology, Pasadena, CA, Report No. 167, translated from German.
- Soulsby, R.L. (1997).** Dynamics of marine sands. Technical Report. Thomas Telford.
- Soulsby, R., & Richards, S. (1997).** Bedload transport in mixed sediments in coastal engineering. HR Wallingford Report SR 987.
- Velegrakis, A., Bishop, C., Lafite, R., Oikonomou, E., Lecouturier, M., Collins, M., 1996.** Sub-Task S3: Investigation of meso-and macro-scale sediment transport, Hydrodynamics Biogeochemical Processes and Fluxes in the Channel. FLUX- MANCHE II Final report, MAST II, MAS2CT940089, 128–143.
- Velegrakis, A. F., Michel, D., Collins, M. B., Lafite, R., Oikonomou, E. K., Dupont, J. P., Huault, M. F., Lecouturier, M., Salomon, J. C., Bishop, C., 1999.** Sources, sinks and resuspension of suspended particulate matter in the eastern English Channel. *Continental Shelf Research* 19 (15-16), 1933–1957.
- Wu, W., & Lin, C. (2014).** Nonuniform sediment transport under non-breaking waves and currents. *Coastal Engineering*, 90, 1–12. DOI:[10.1016/j.coastaleng.2014.04.006](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.006).

7. Annexes

7.1 Point P1

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 0.90$ mm

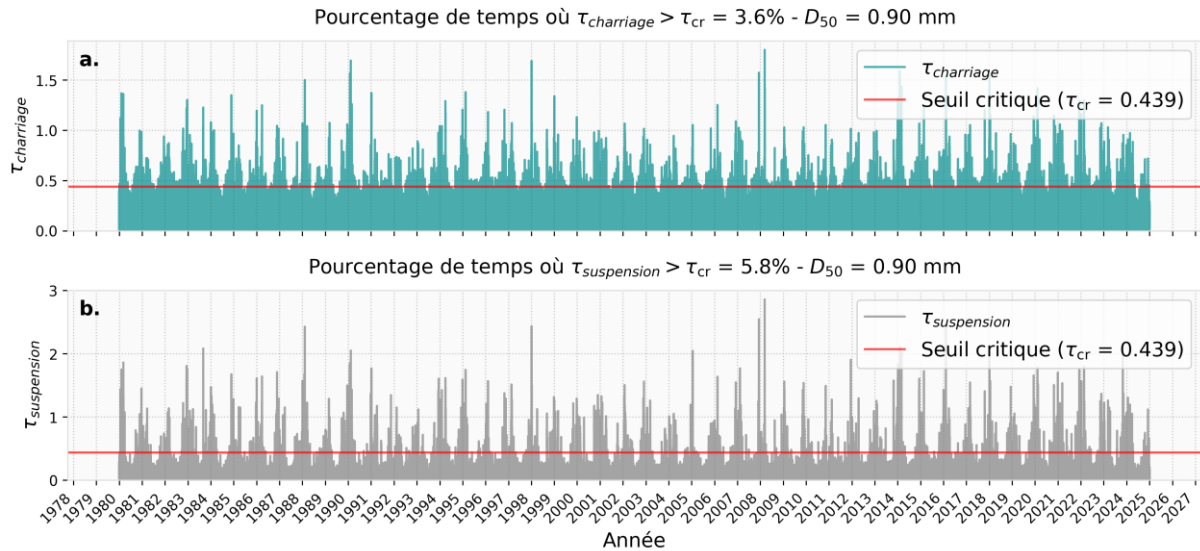


Figure 24. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P1 (Ouest). **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.04$ mm

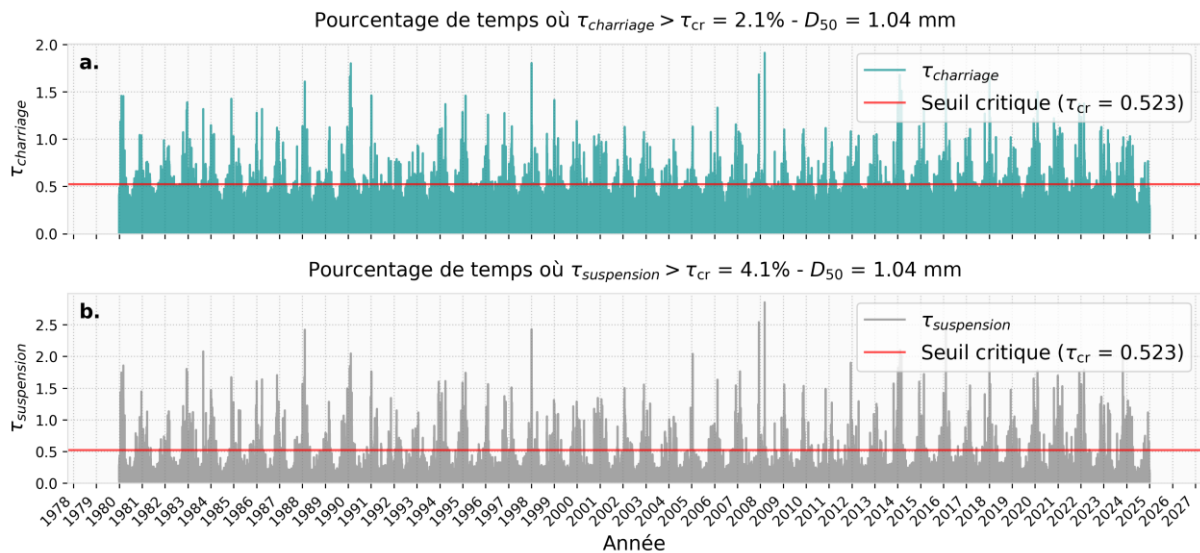


Figure 25. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$

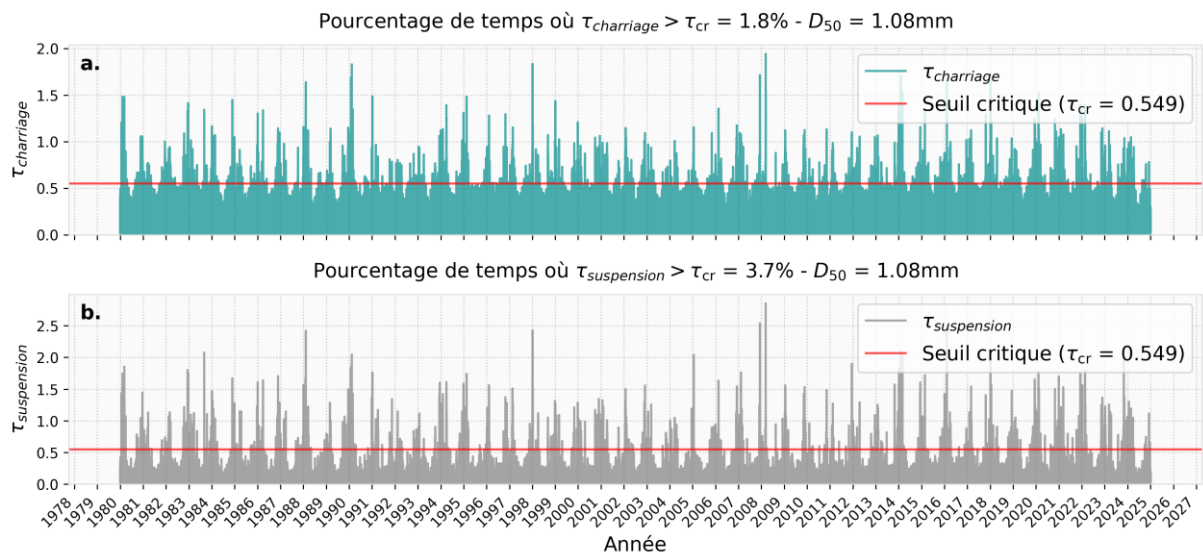


Figure 26. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.22\text{ mm}$

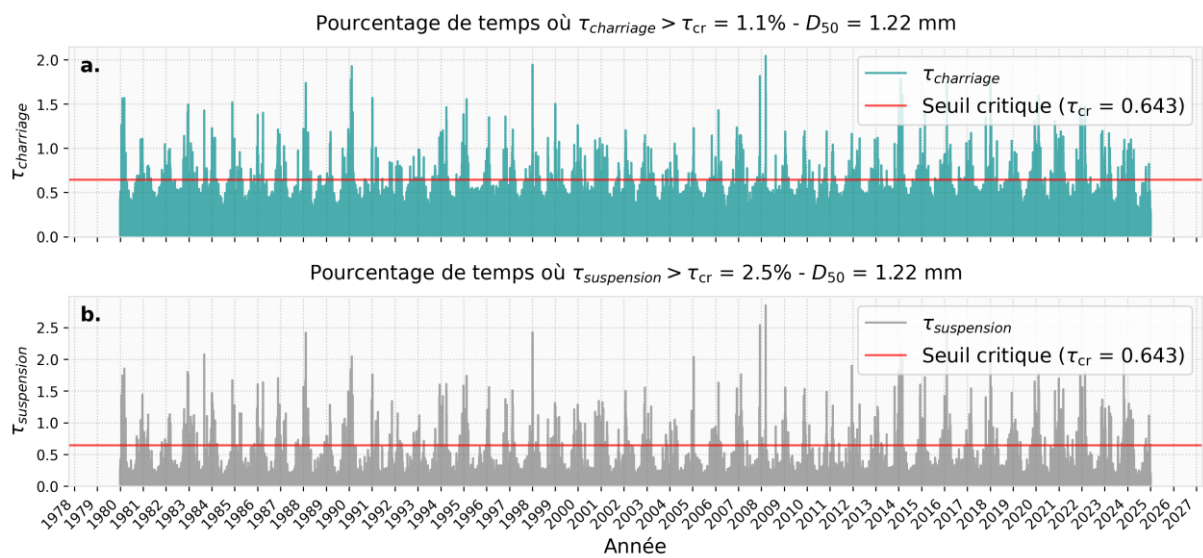


Figure 27. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22\text{ mm}$ au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

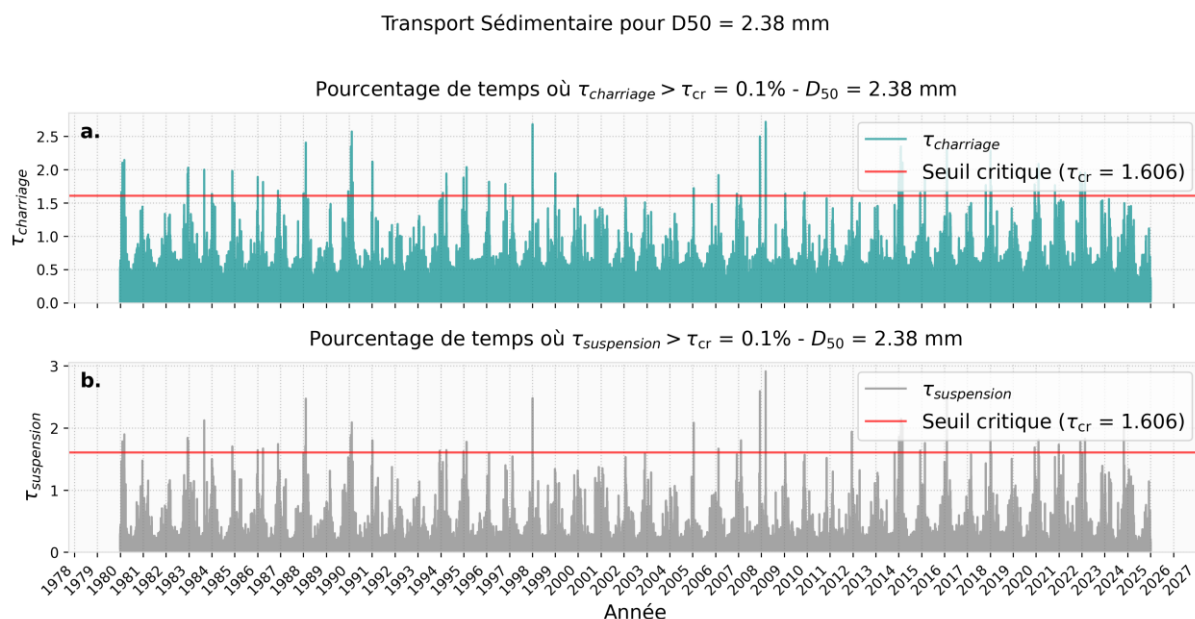


Figure 28. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

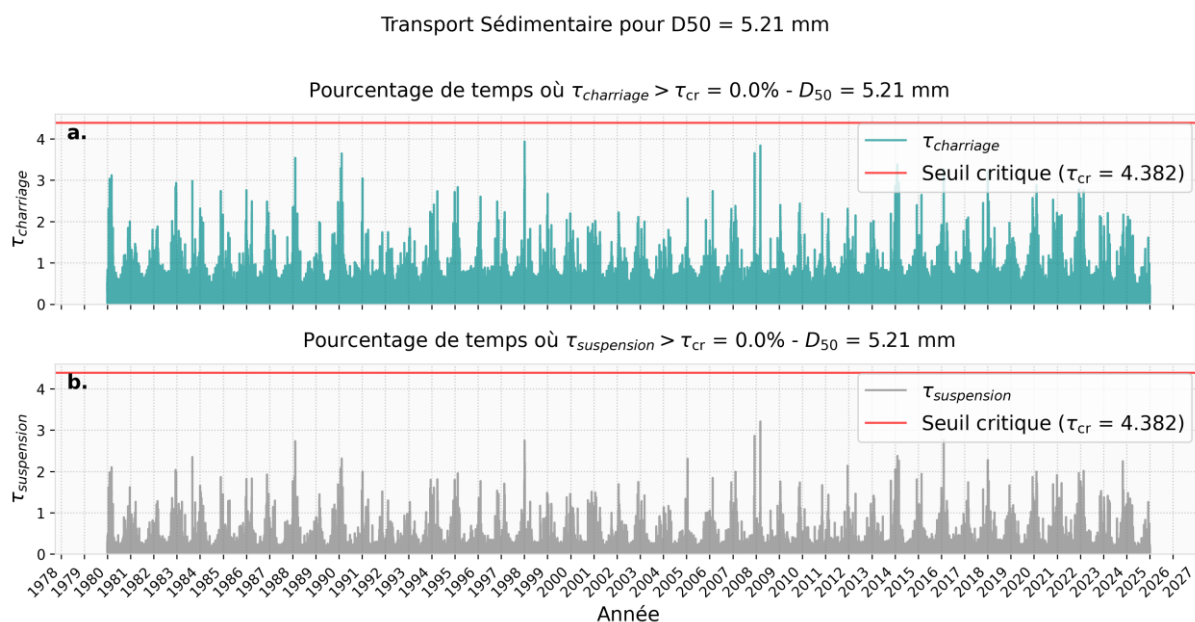


Figure 29. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 5.71 \text{ mm}$

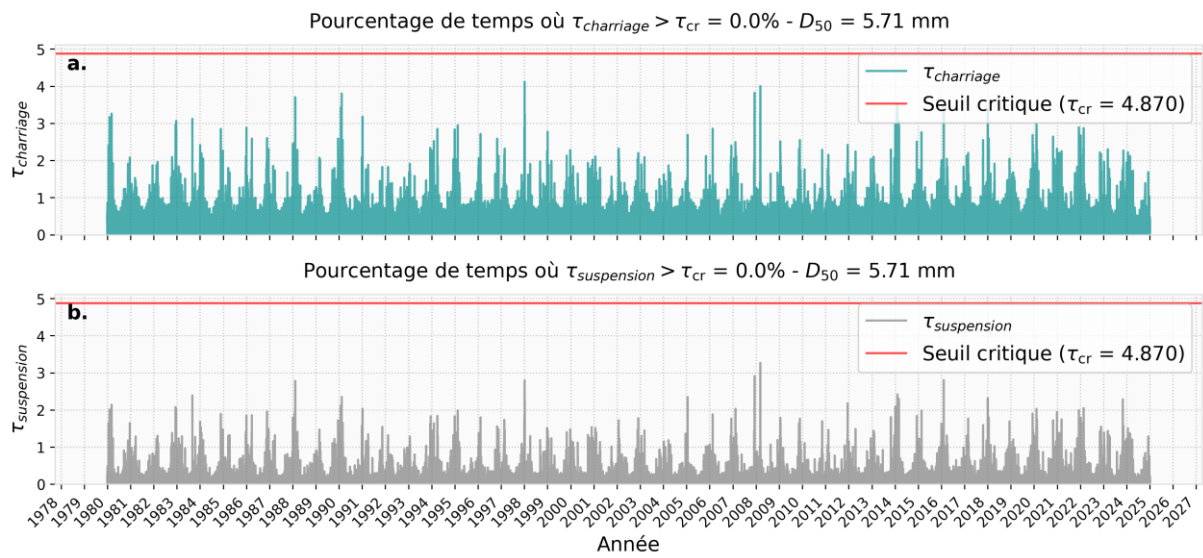


Figure 30. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71 \text{ mm}$ au Point P1. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

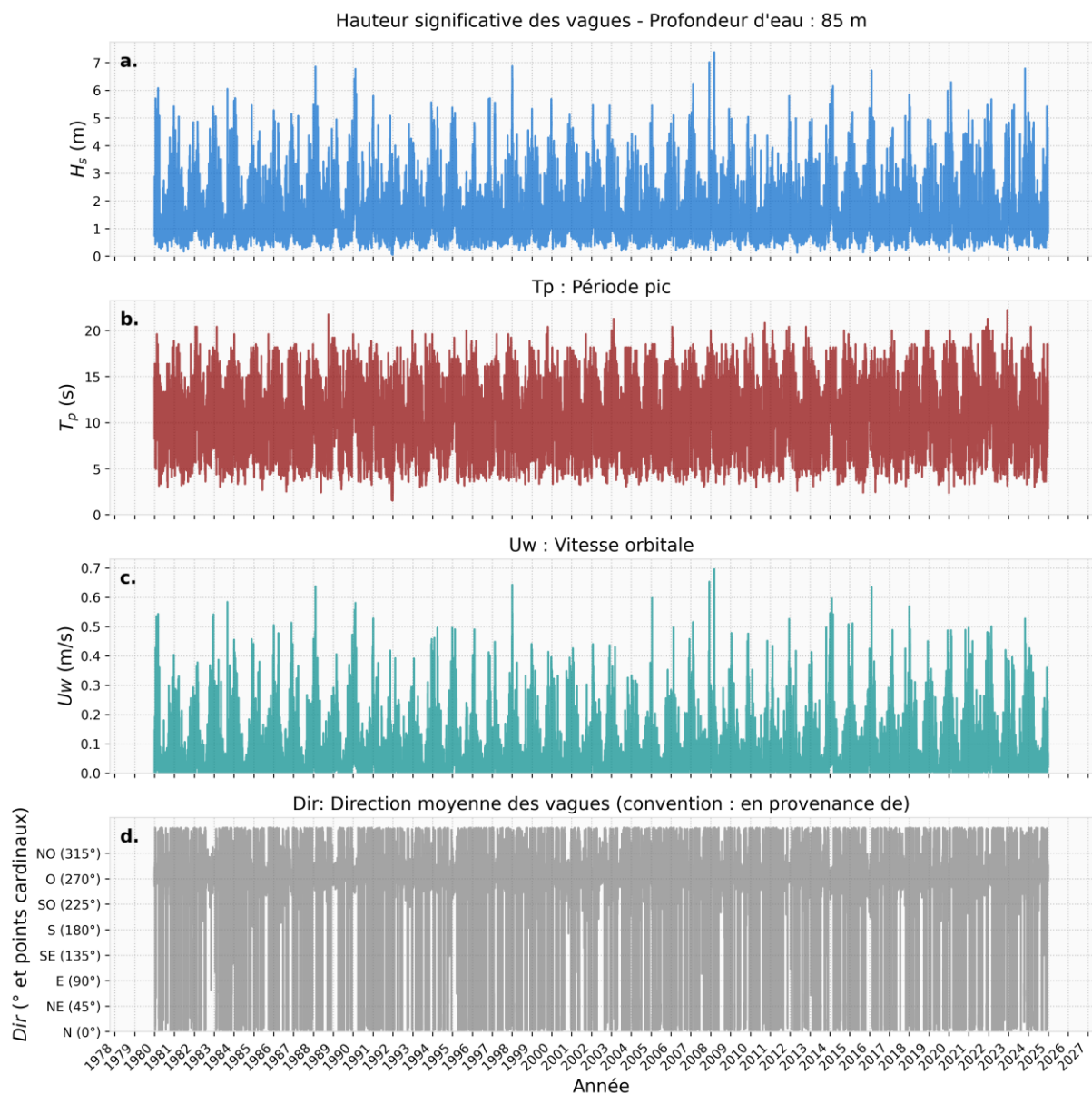


Figure 31. Séries temporelles extraites au Point P1, sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux).

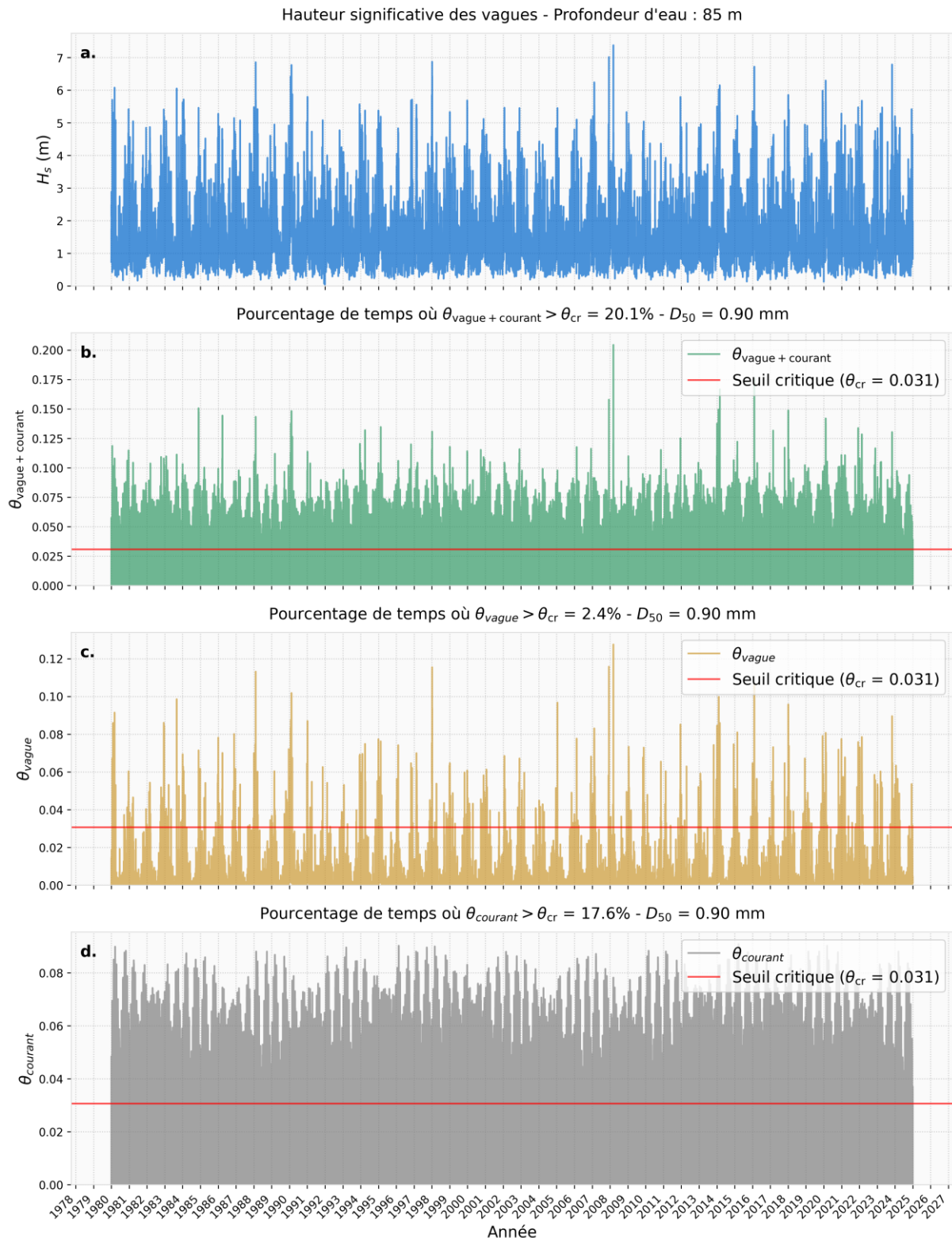
Analyse pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 32. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

Analyse pour $D_{50} = 1.04$ mm

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 85 m

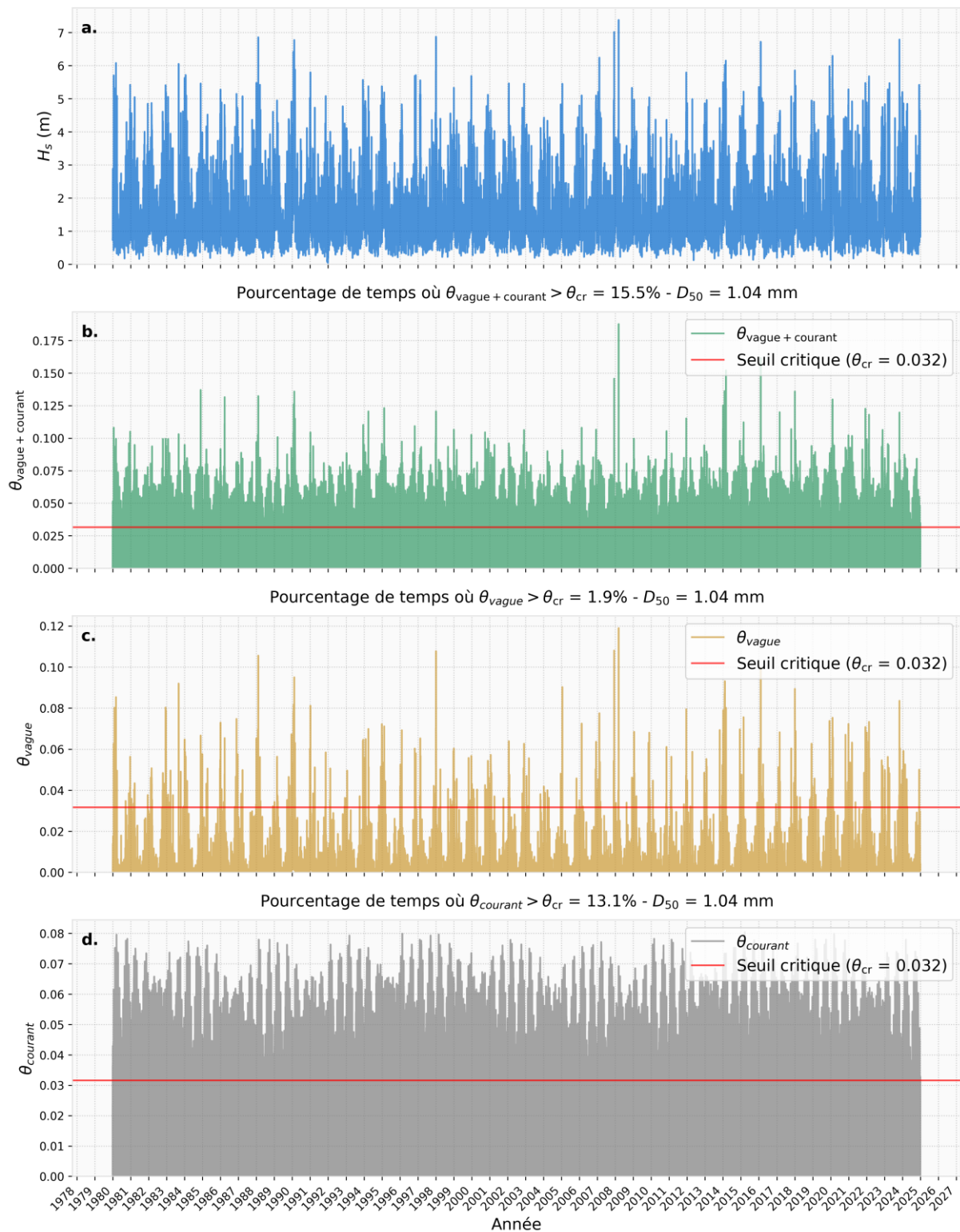


Figure 33. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

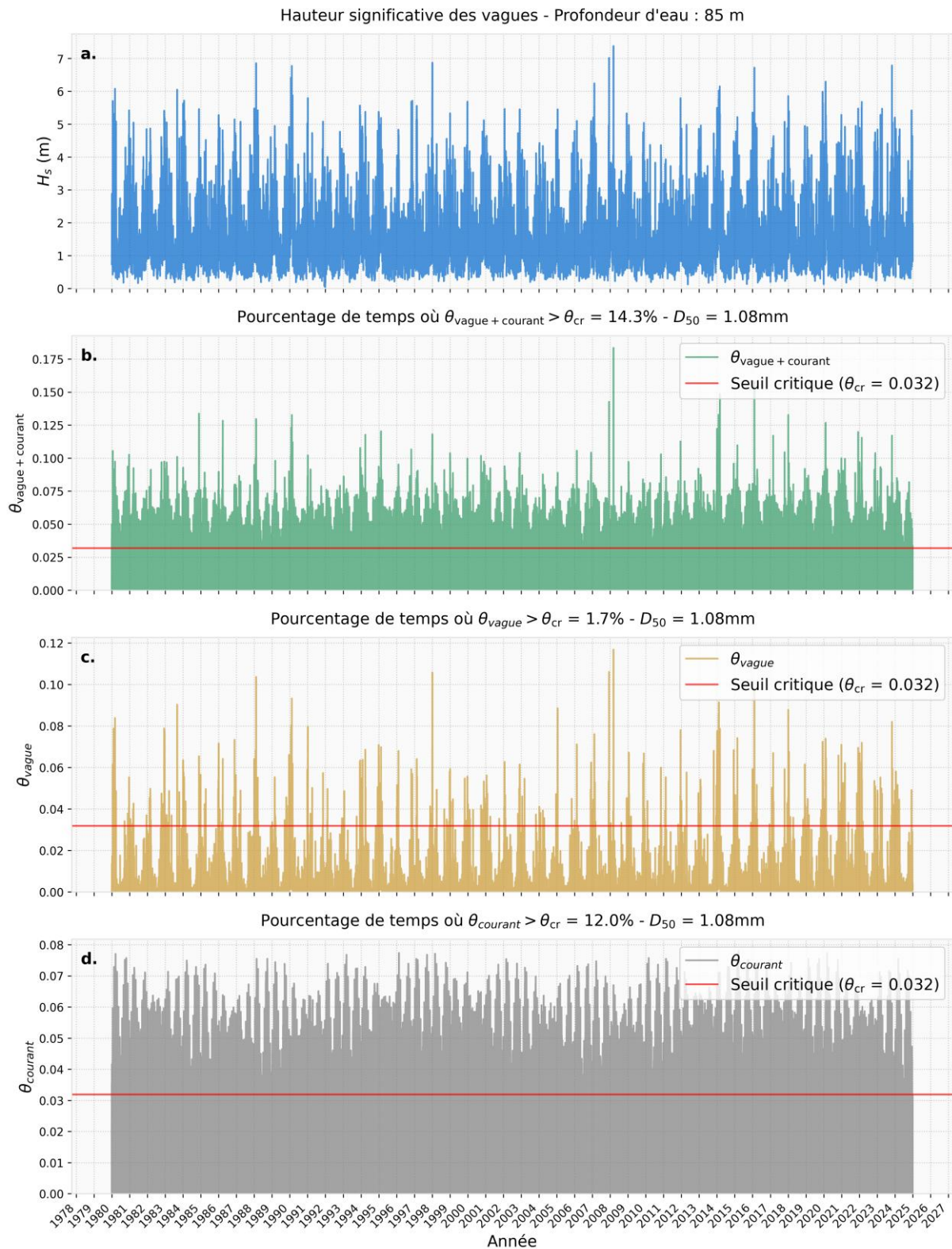
Analyse pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$ 

Figure 34. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

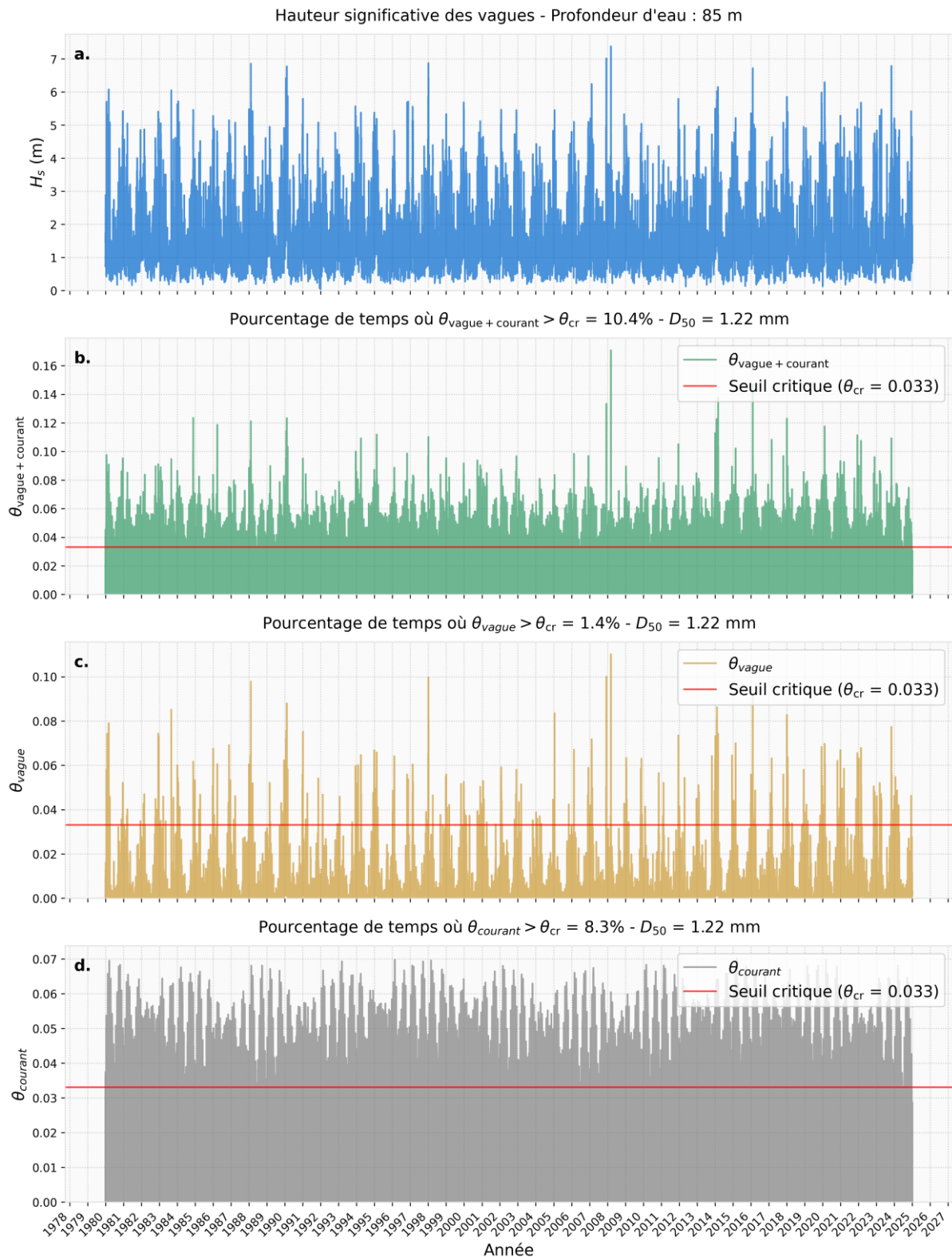
Analyse pour $D_{50} = 1.22$ mm

Figure 35. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

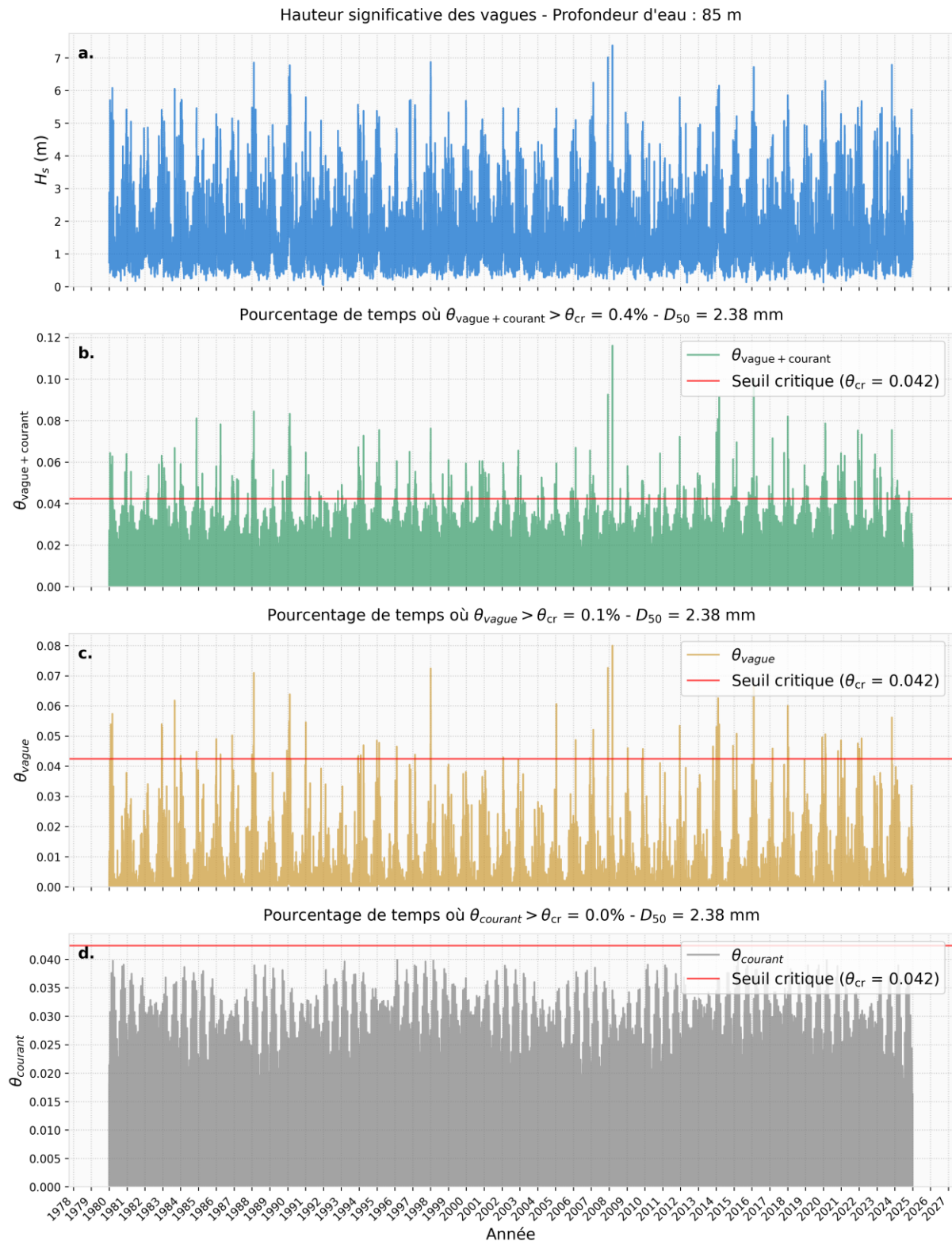
Analyse pour $D_{50} = 2.38$ mm

Figure 36. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

Analyse pour $D_{50} = 5.21$ mm

Figure 37. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

Analyse pour $D_{50} = 5.71$ mm

Figure 38. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P1. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 0.90$ mm

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 85 m

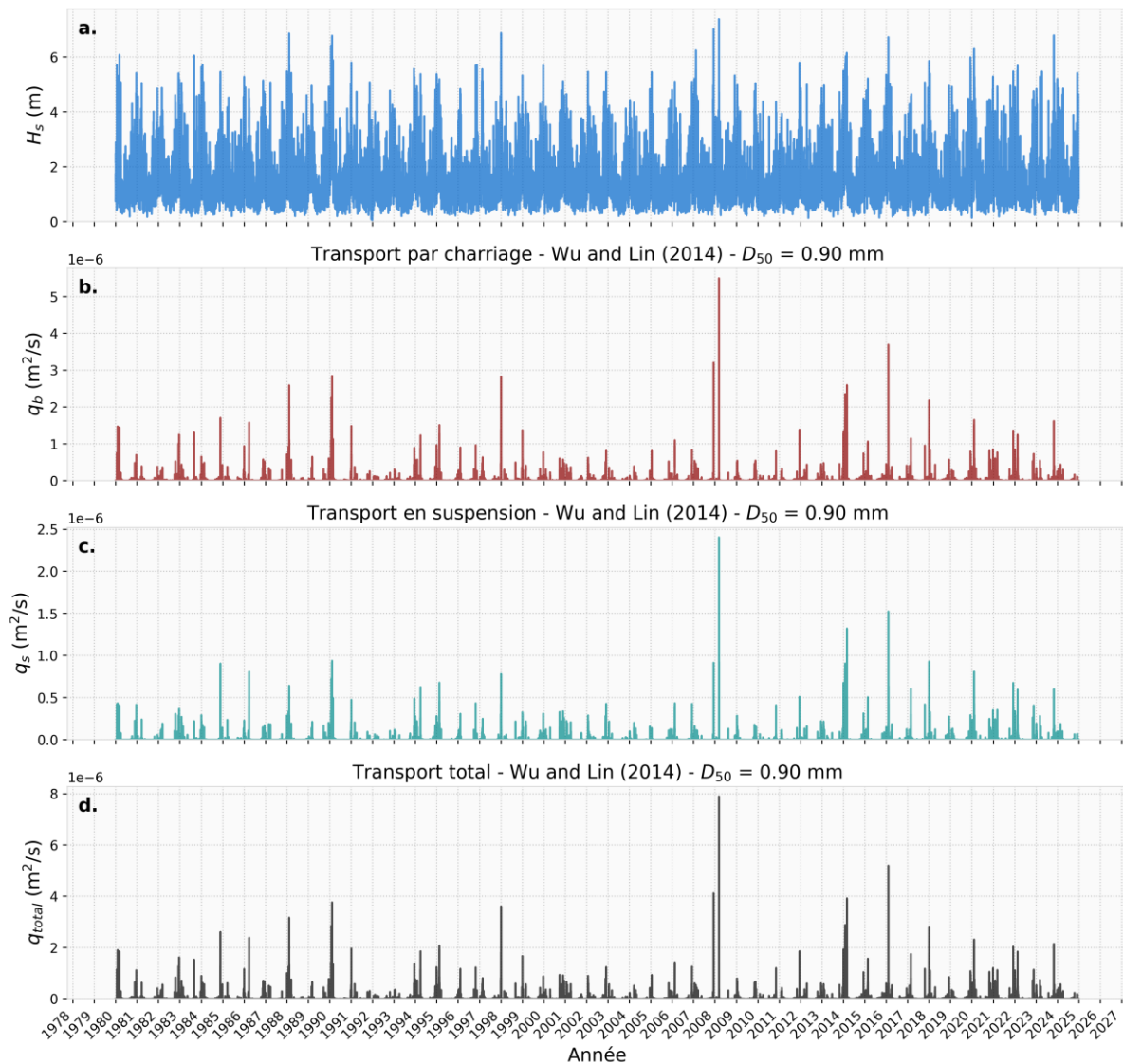


Figure 39. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.04 \text{ mm}$

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 85 m

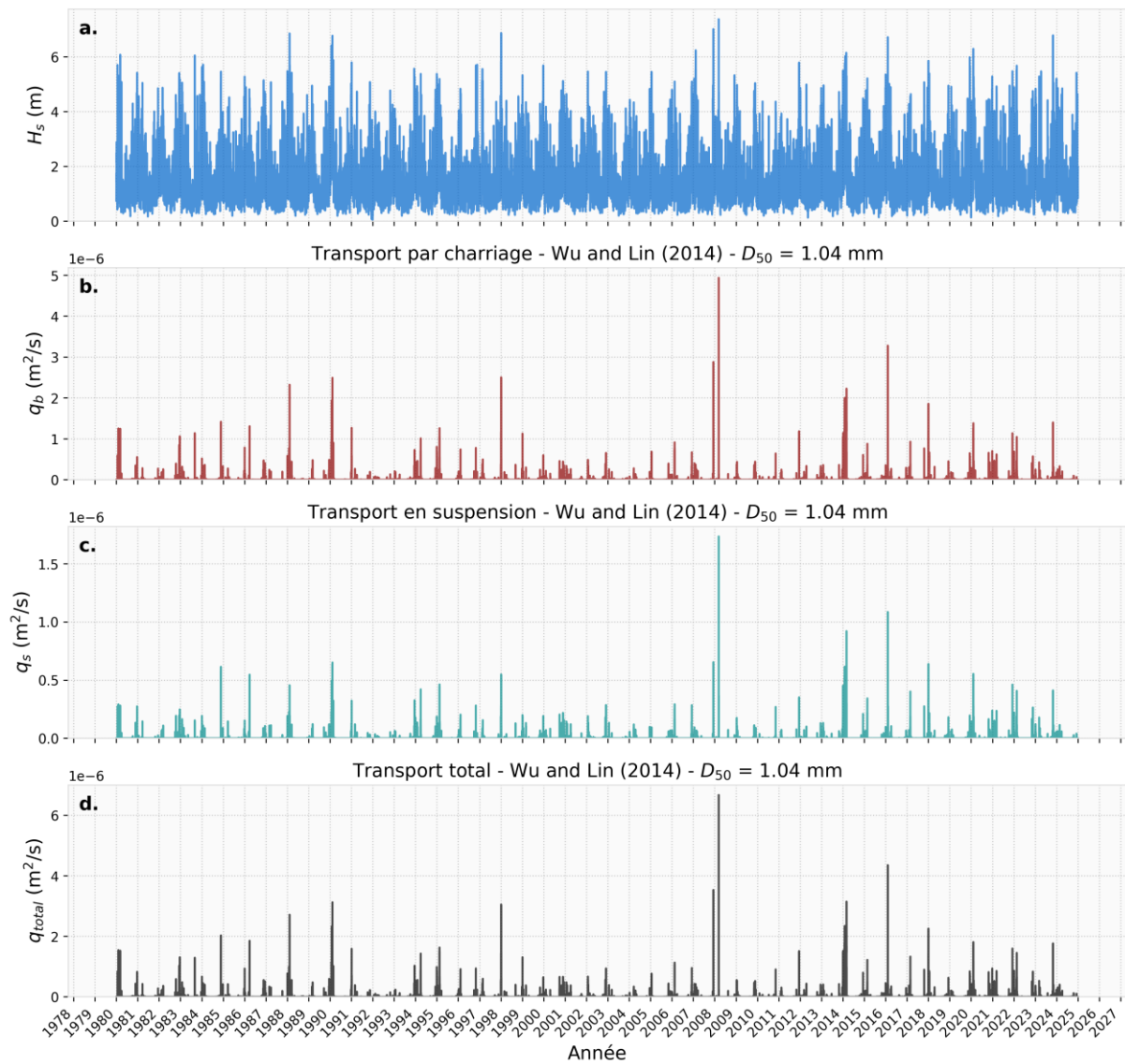


Figure 40. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04\text{mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 85 m

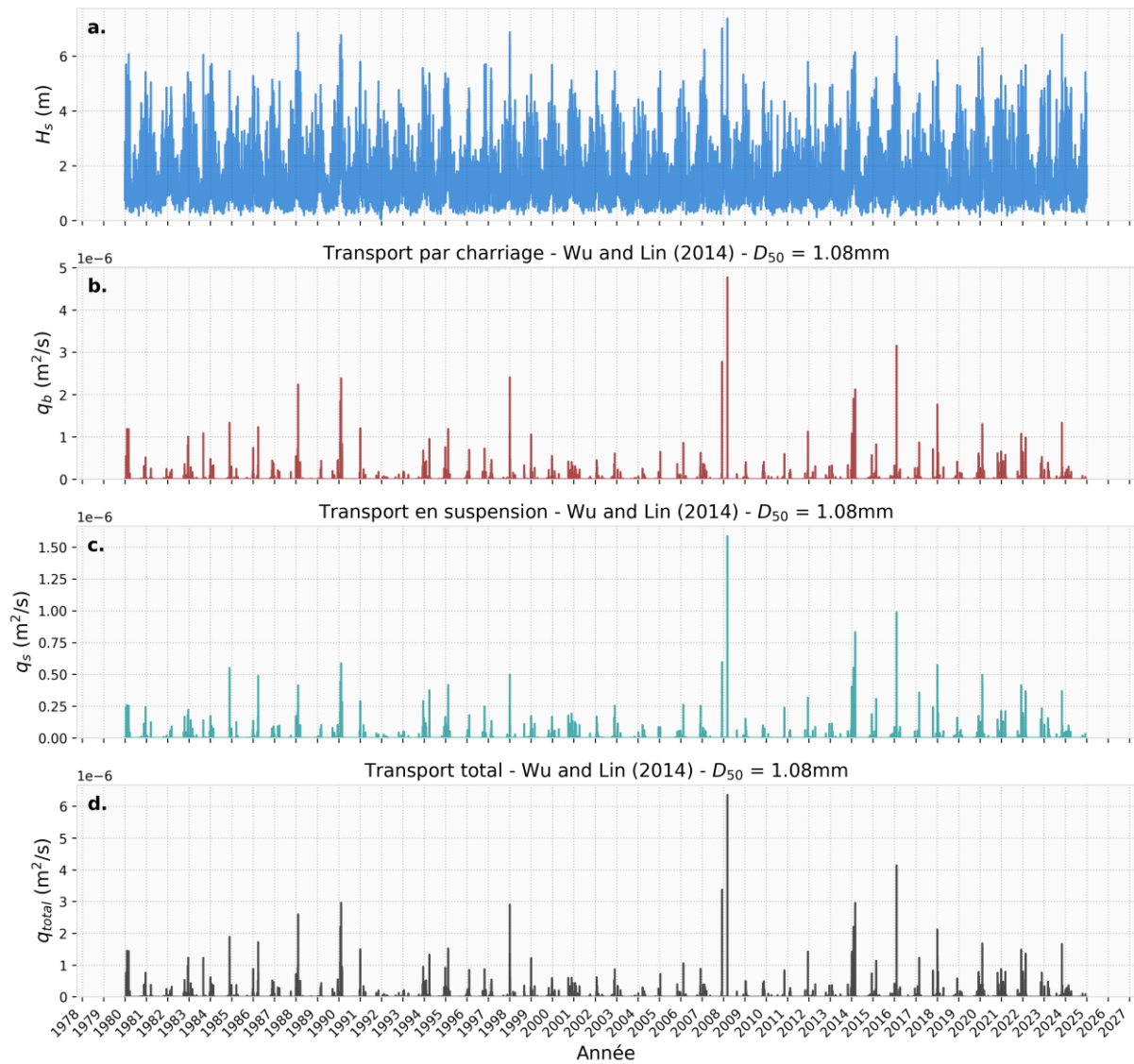


Figure 41. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

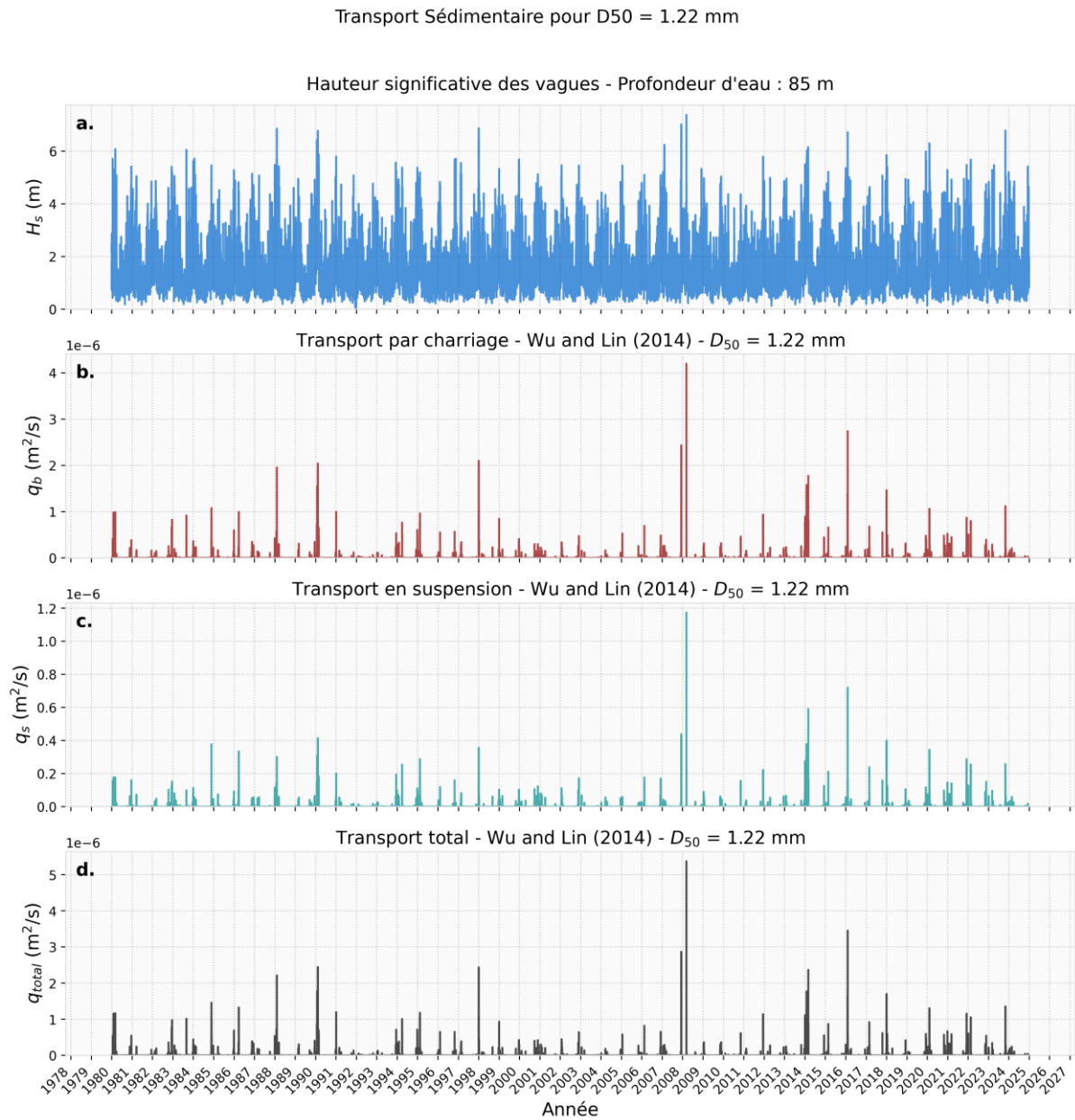


Figure 42. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22 \text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

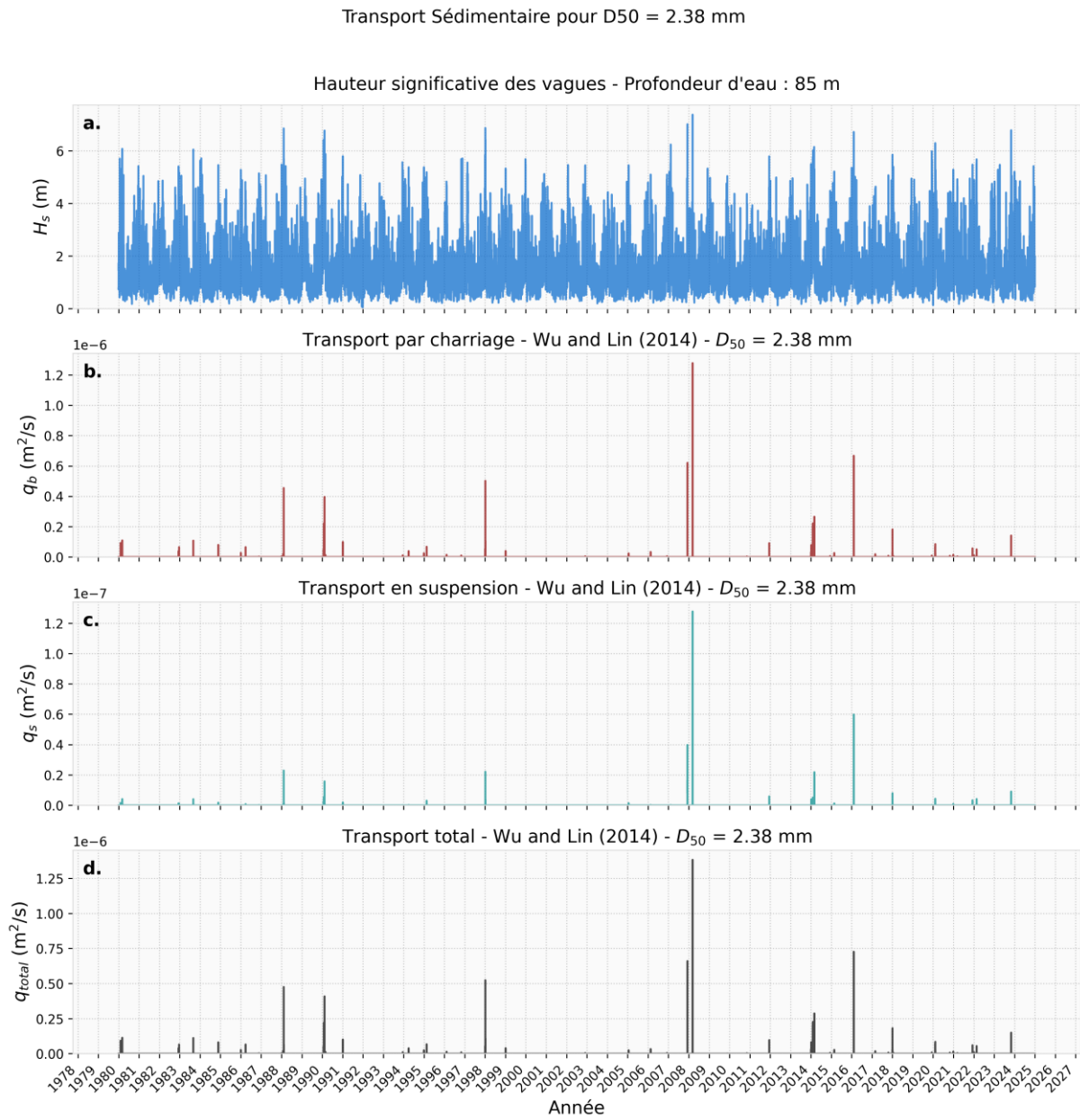


Figure 43. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38 \text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

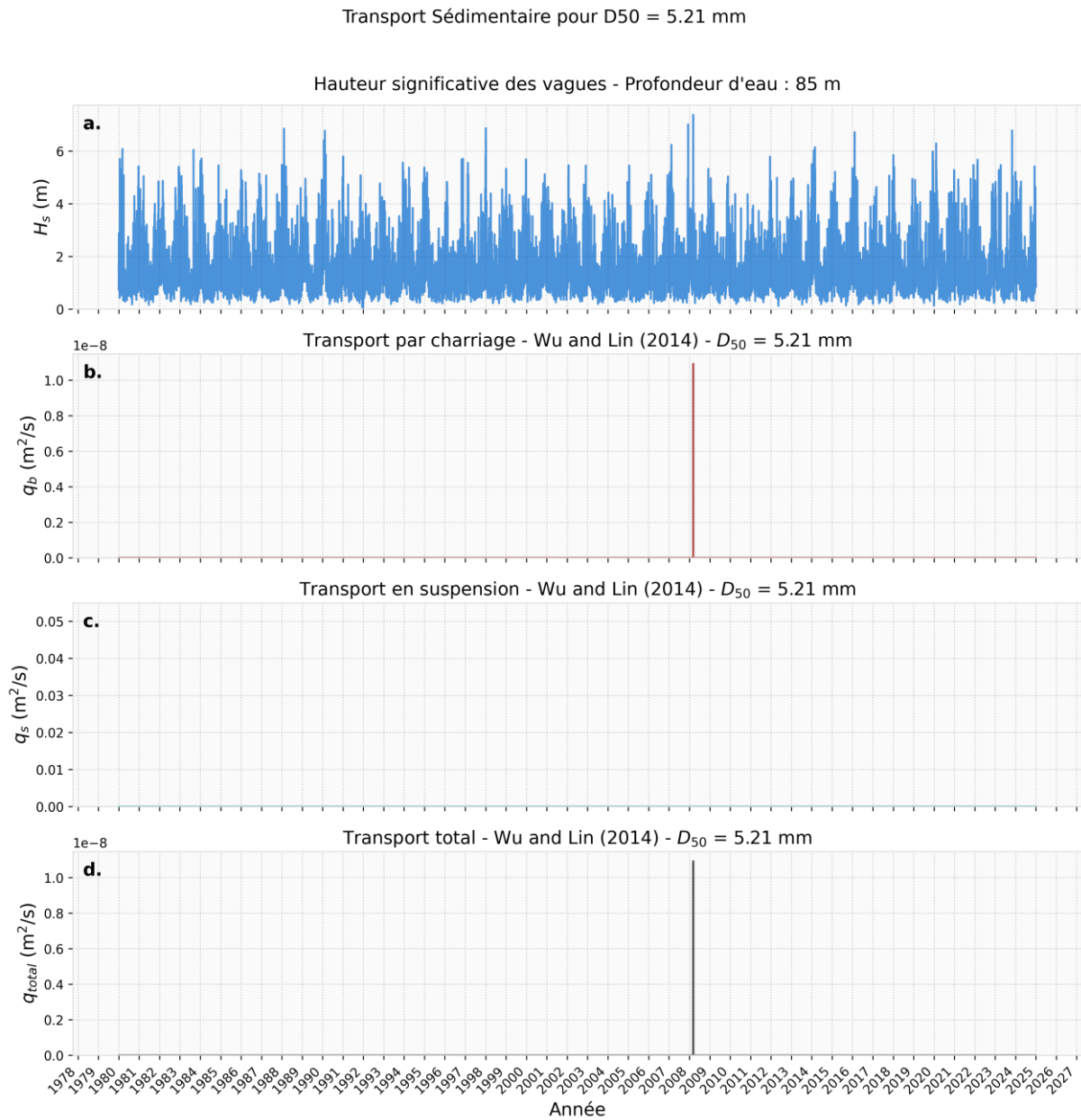


Figure 44. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 5.71 \text{ mm}$

Hauteur significative des vagues - Profondeur d'eau : 85 m

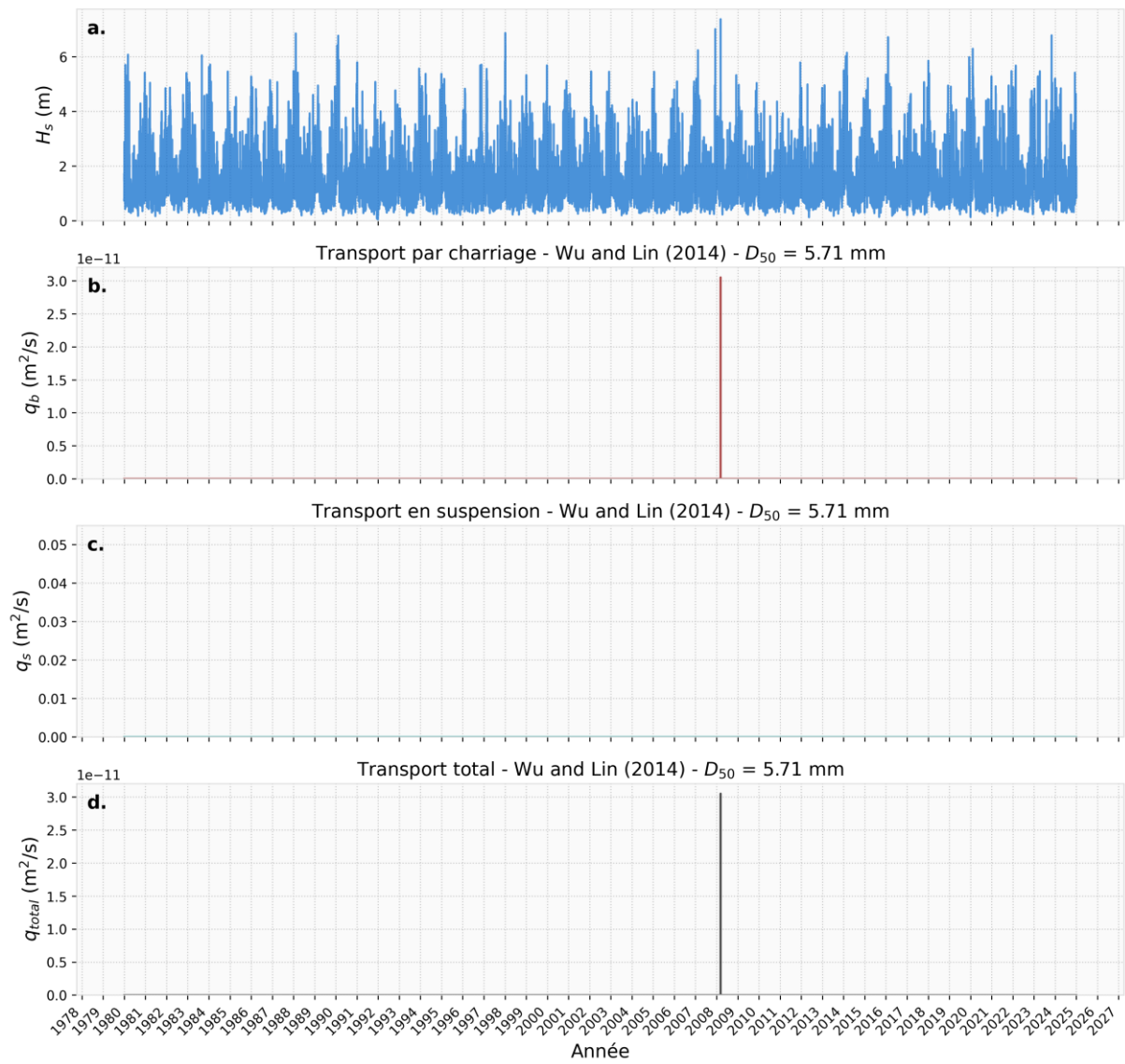


Figure 45. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71 \text{ mm}$ au Point P1. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

7.2 Point P2

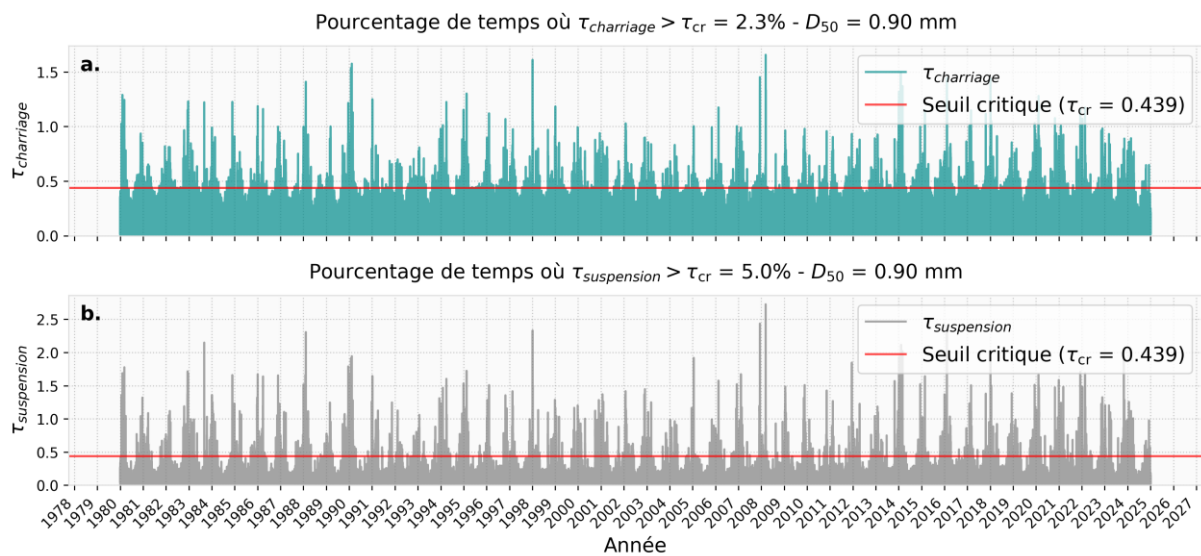
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 46. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

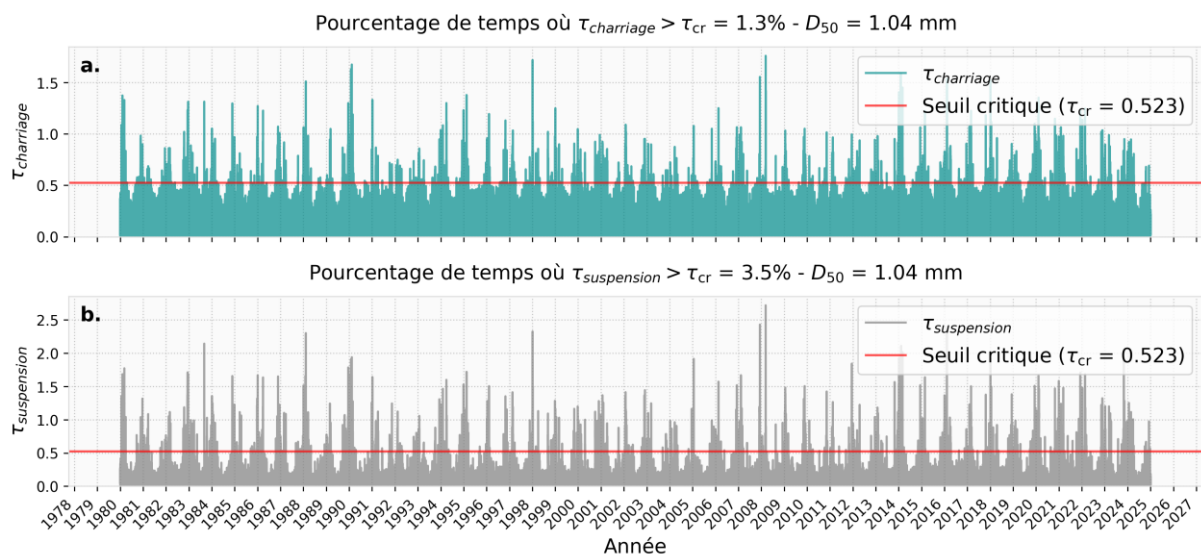
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.04$ mm

Figure 47. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

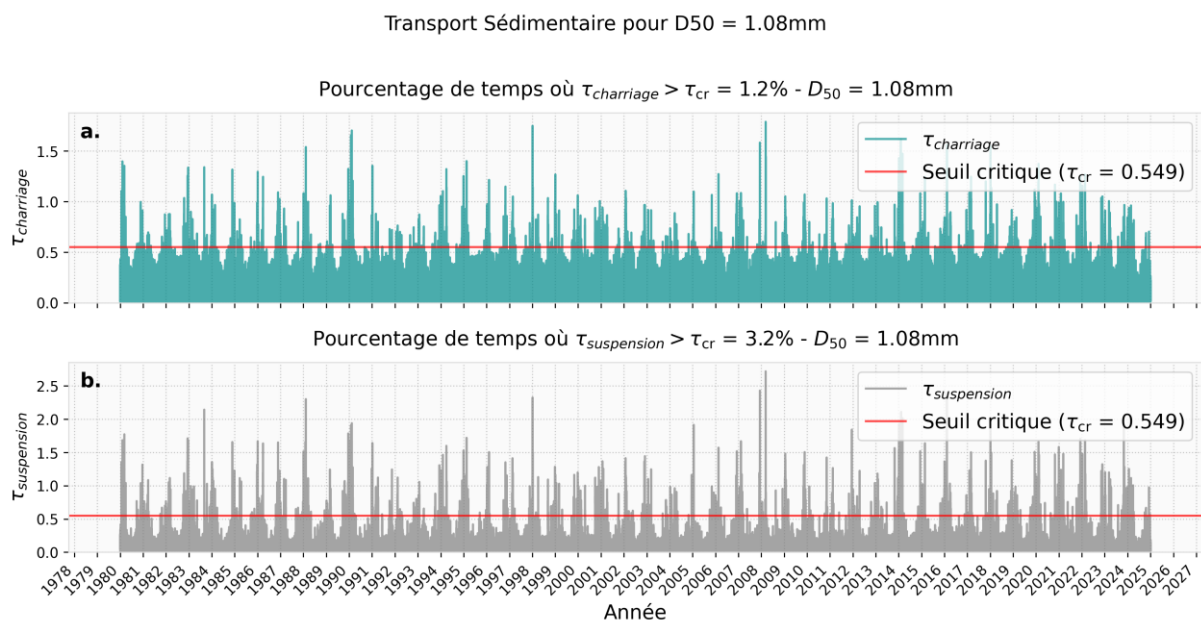


Figure 48. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

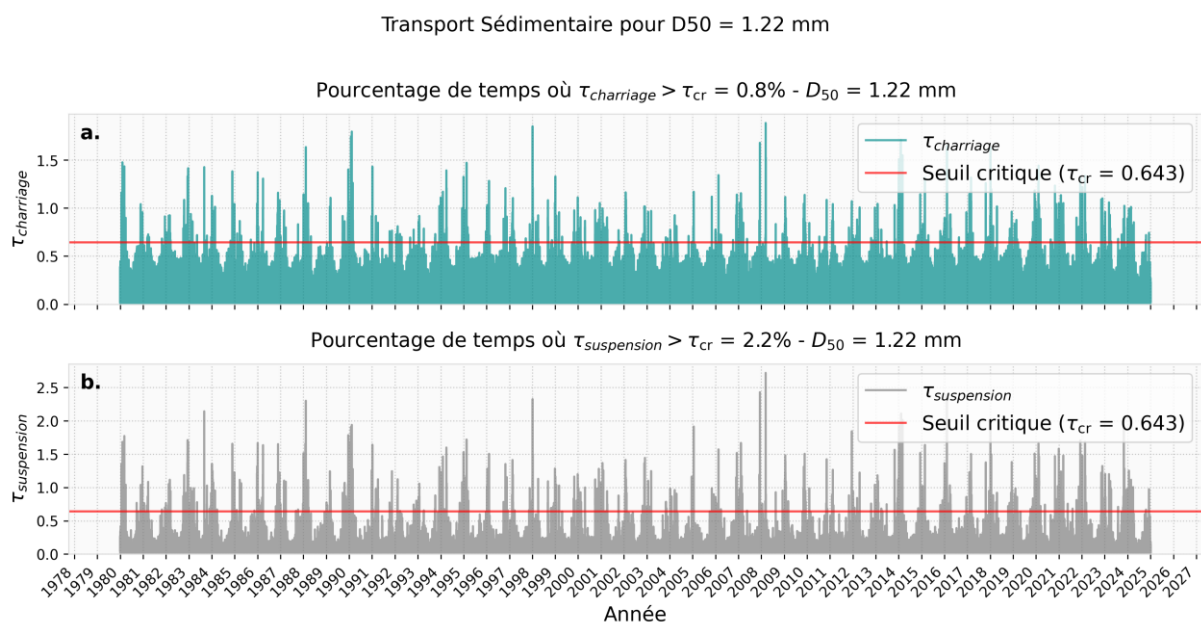


Figure 49. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22\text{ mm}$ au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

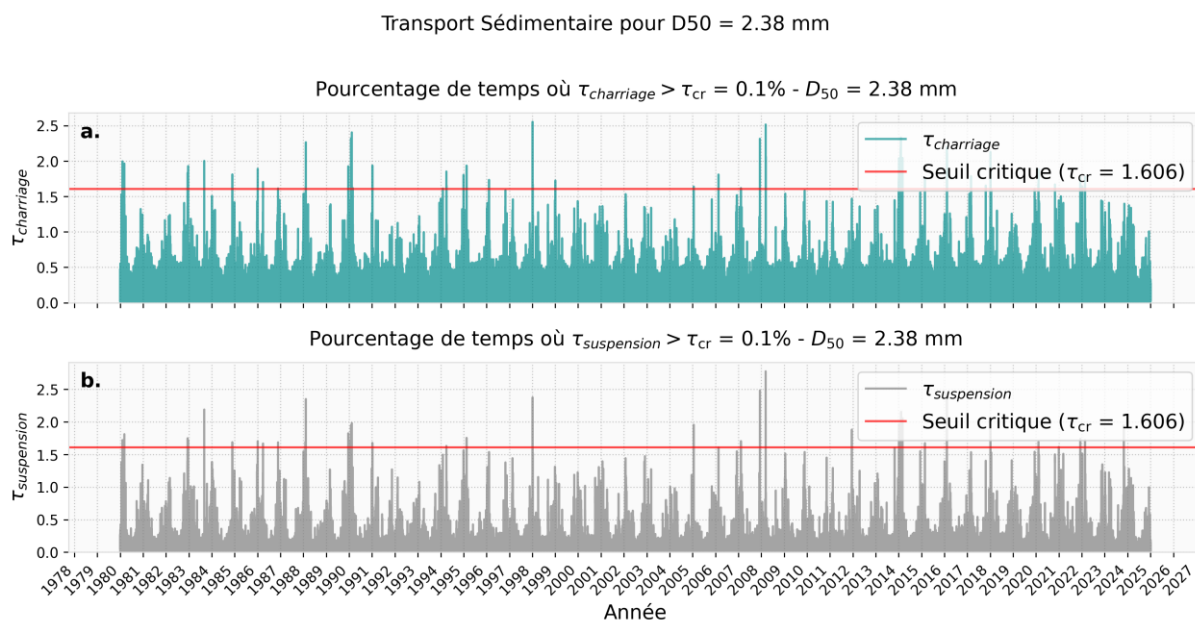


Figure 50. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

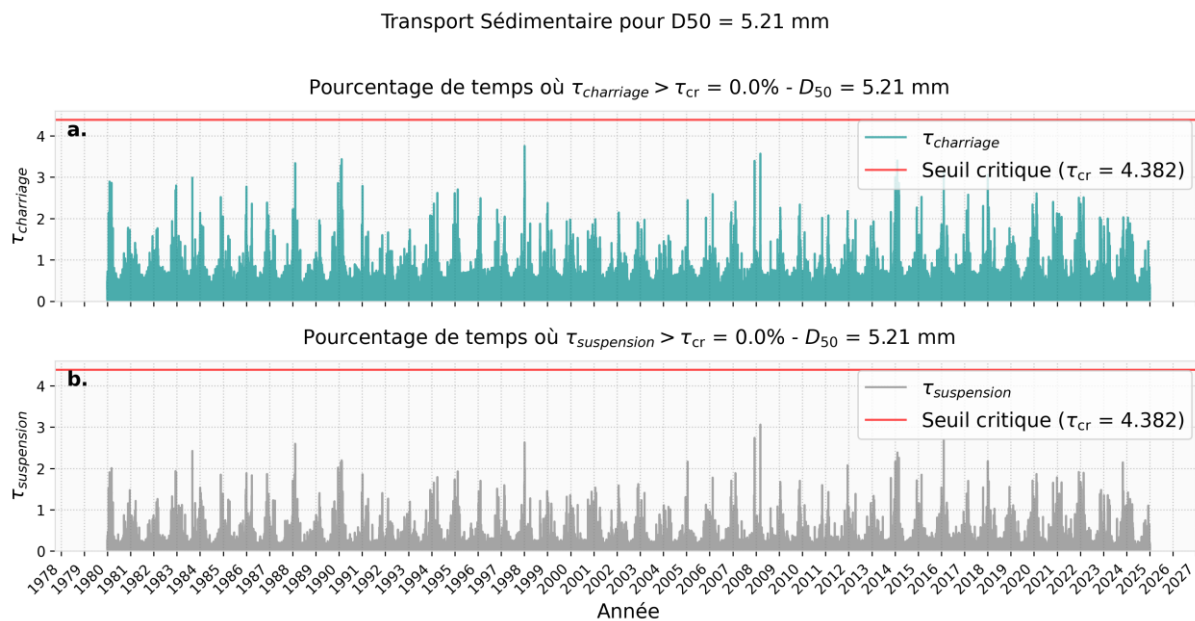


Figure 51. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

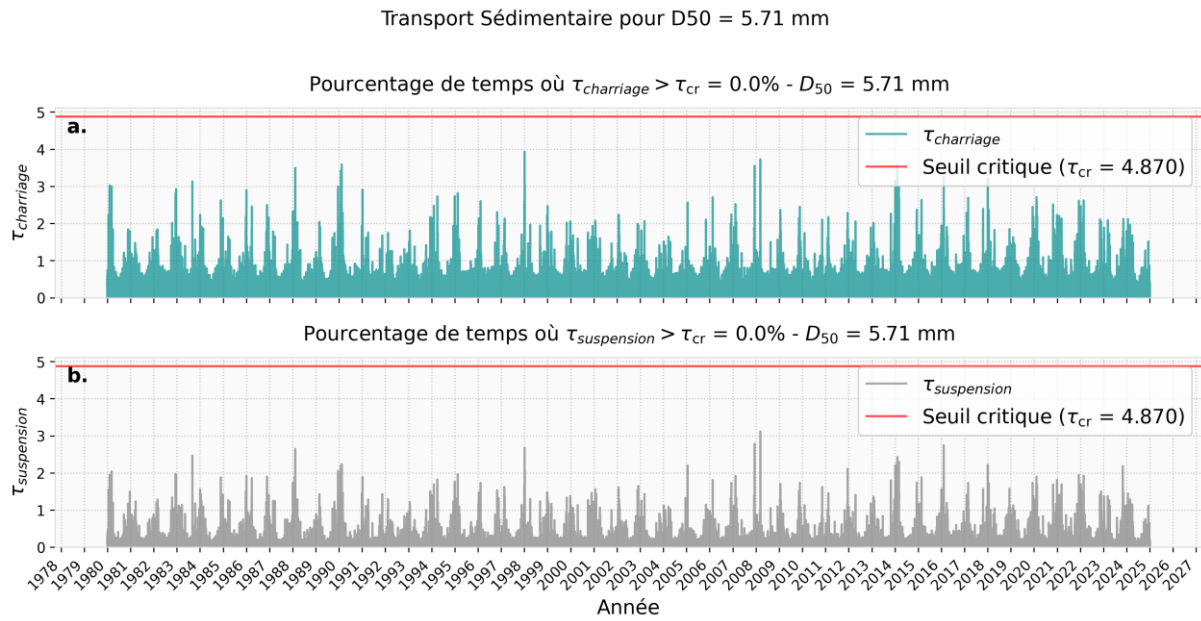


Figure 52. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P2. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

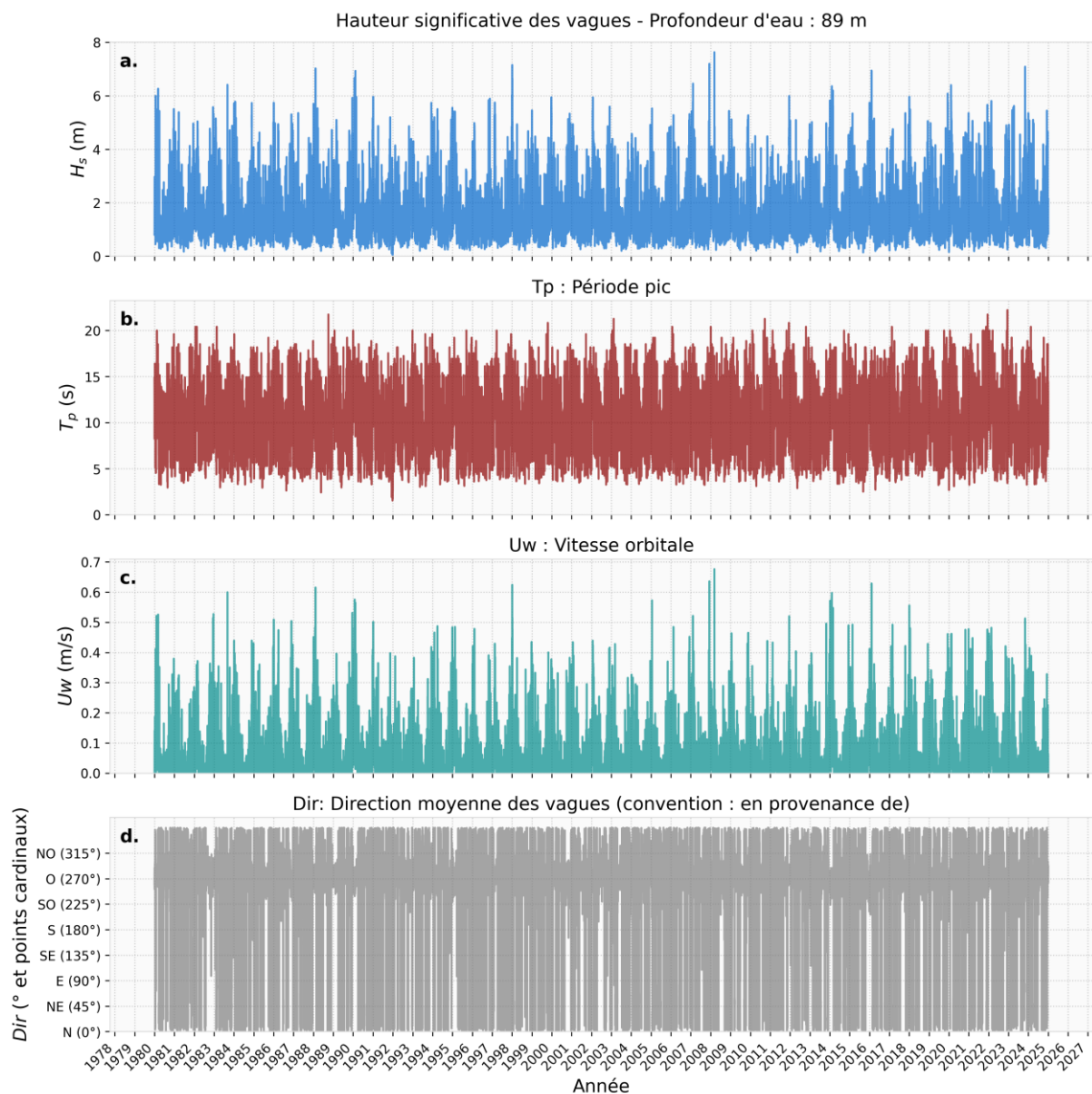


Figure 53. Séries temporelles extraites au Point P2, sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux).

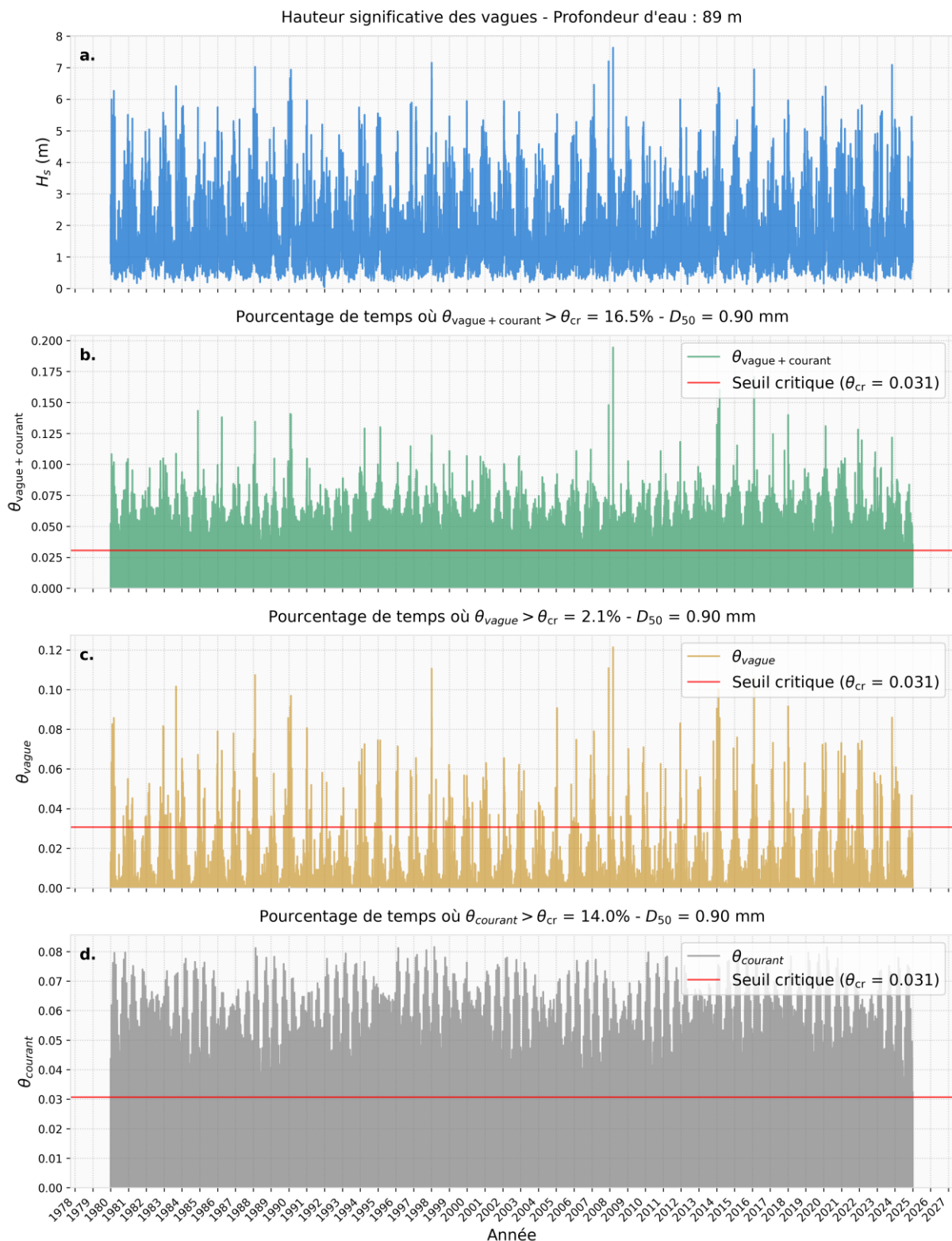
Analyse pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 54. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

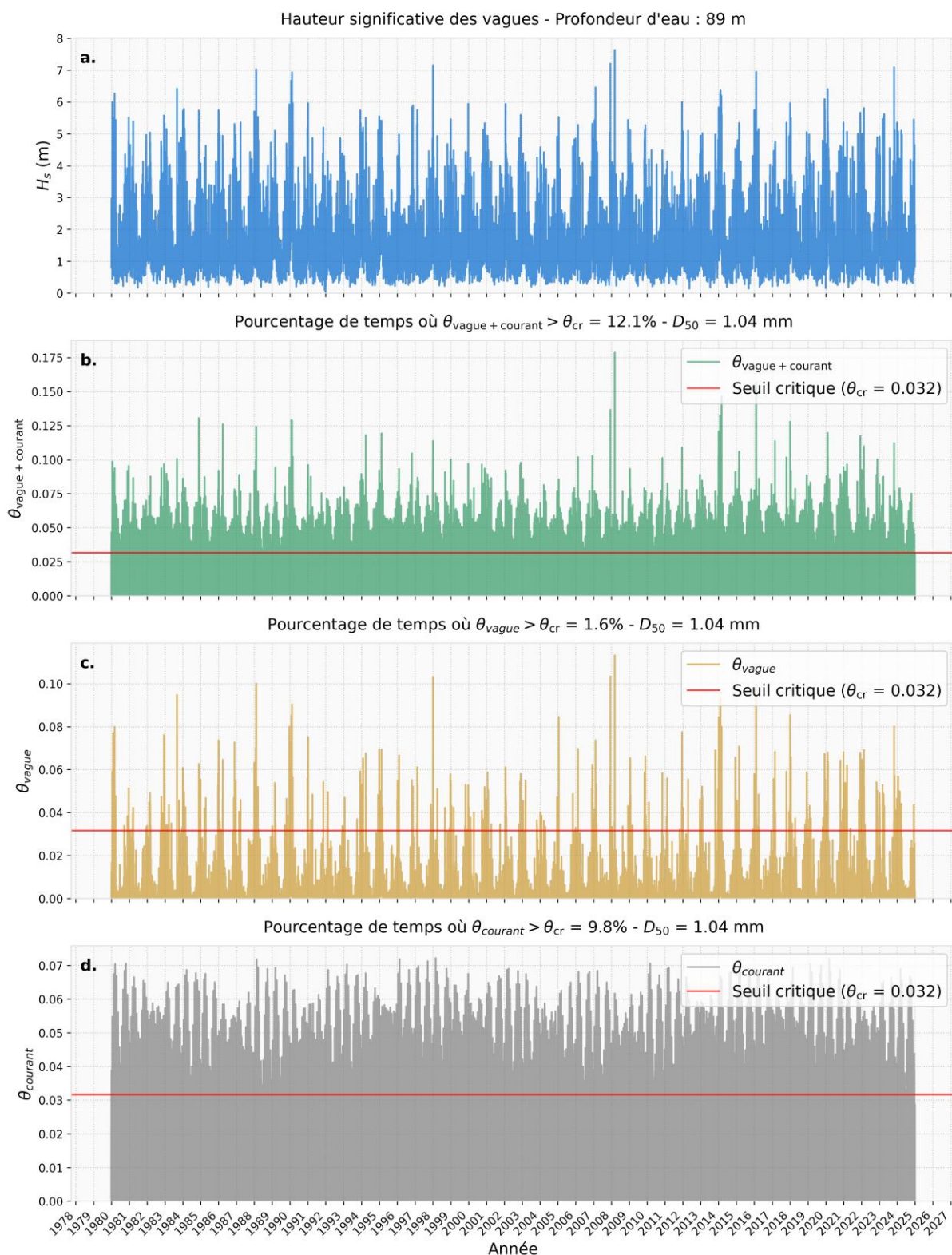
Analyse pour $D_{50} = 1.04$ mm

Figure 55. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

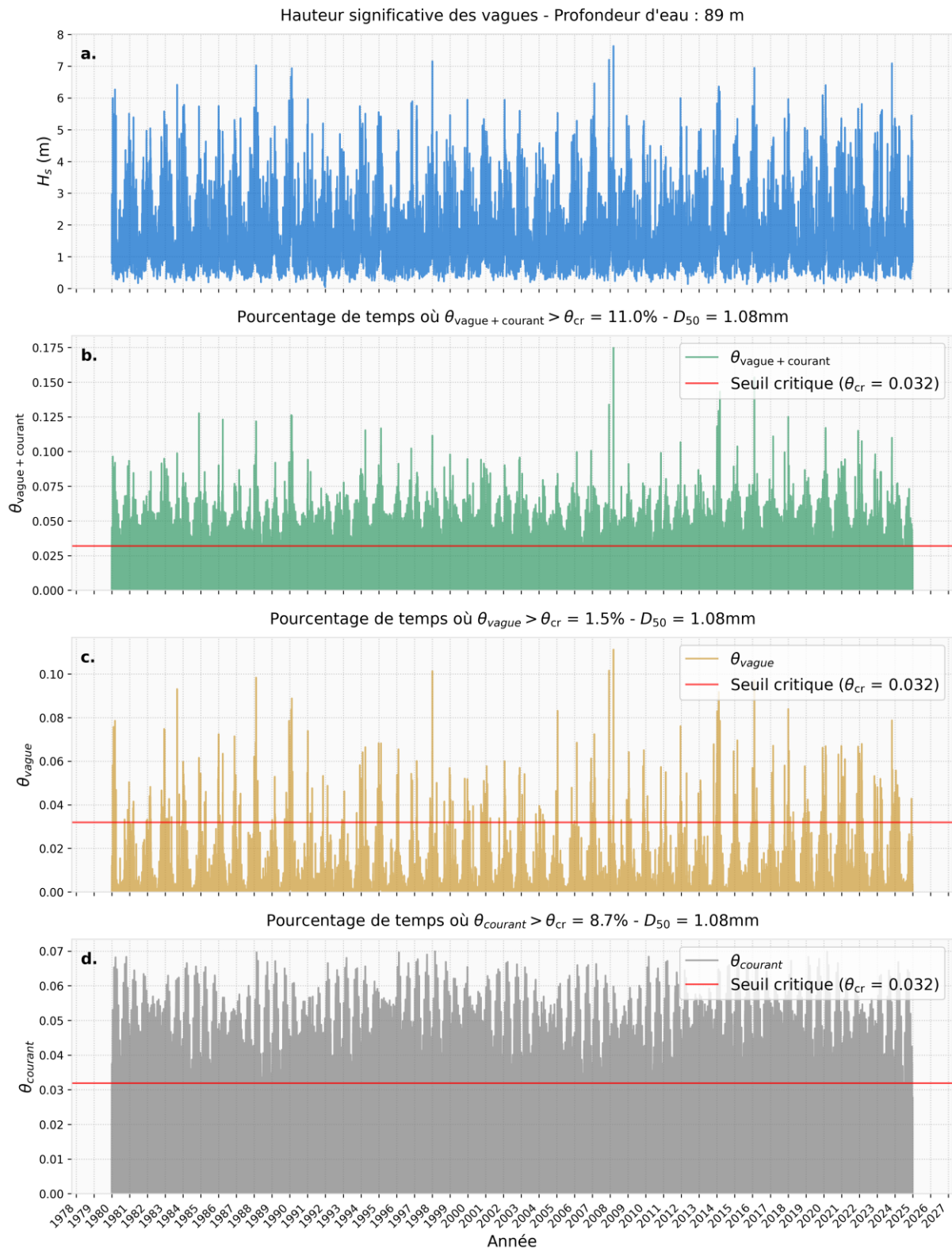
Analyse pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$ 

Figure 56. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

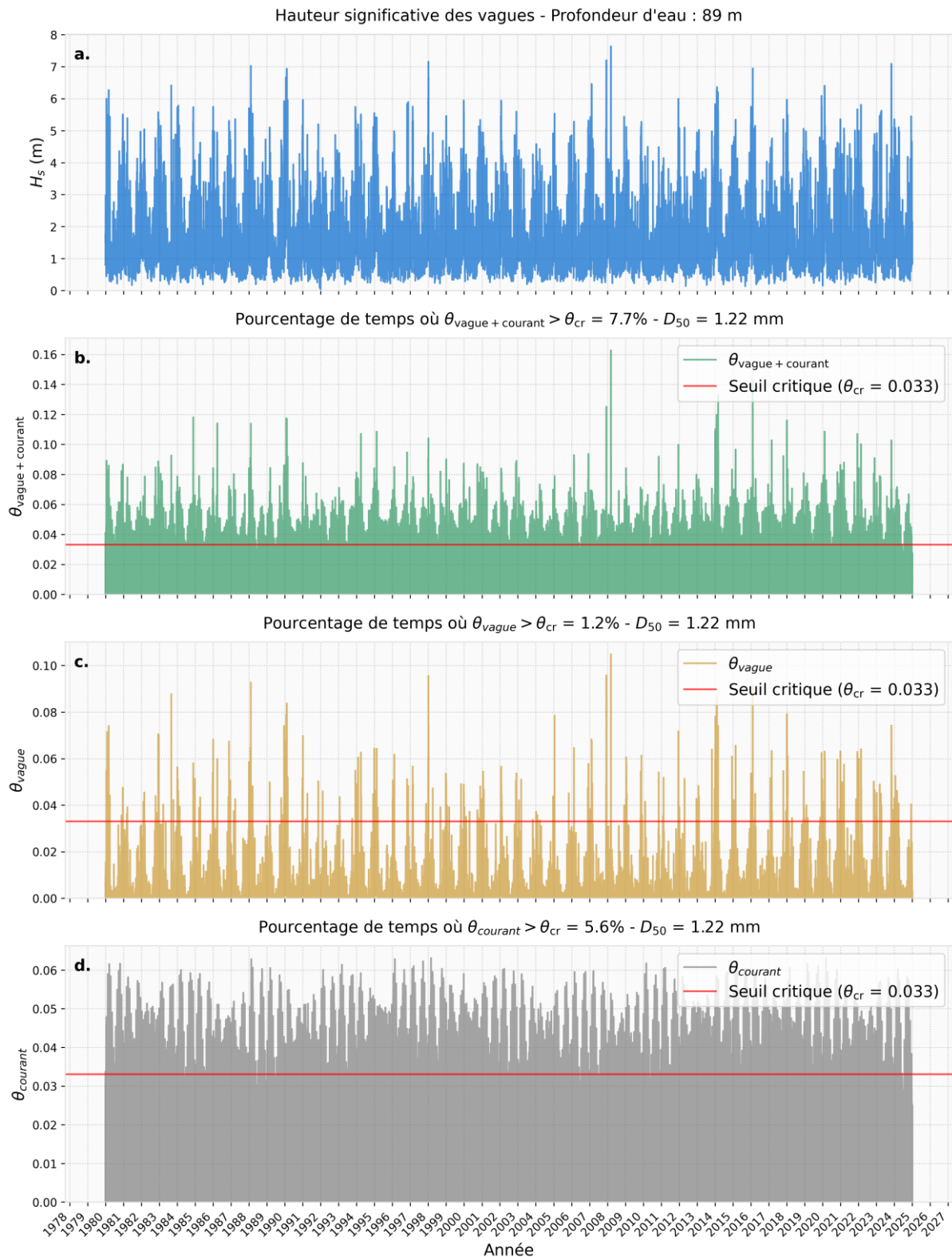
Analyse pour $D_{50} = 1.22$ mm

Figure 57. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

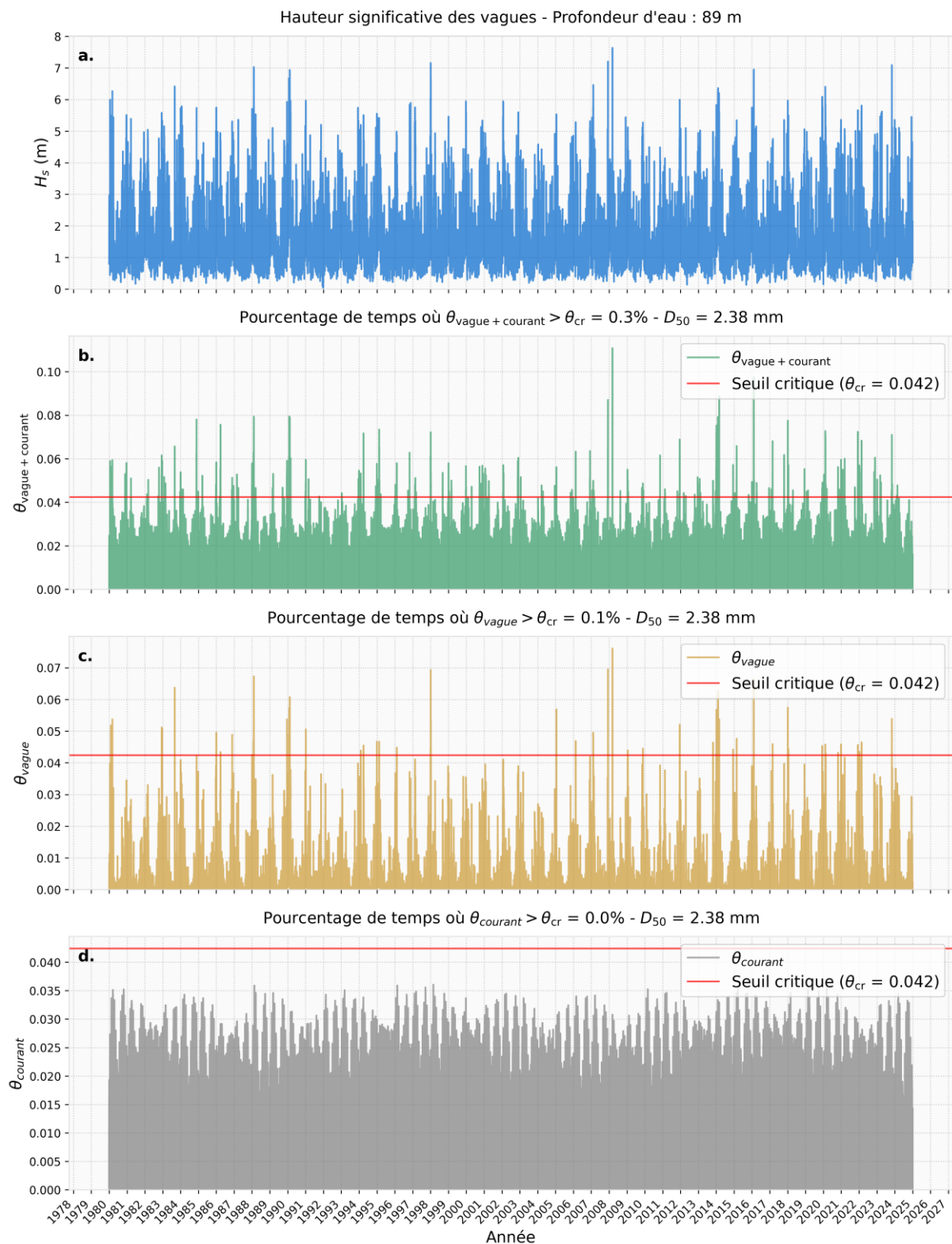
Analyse pour $D_{50} = 2.38$ mm

Figure 58. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

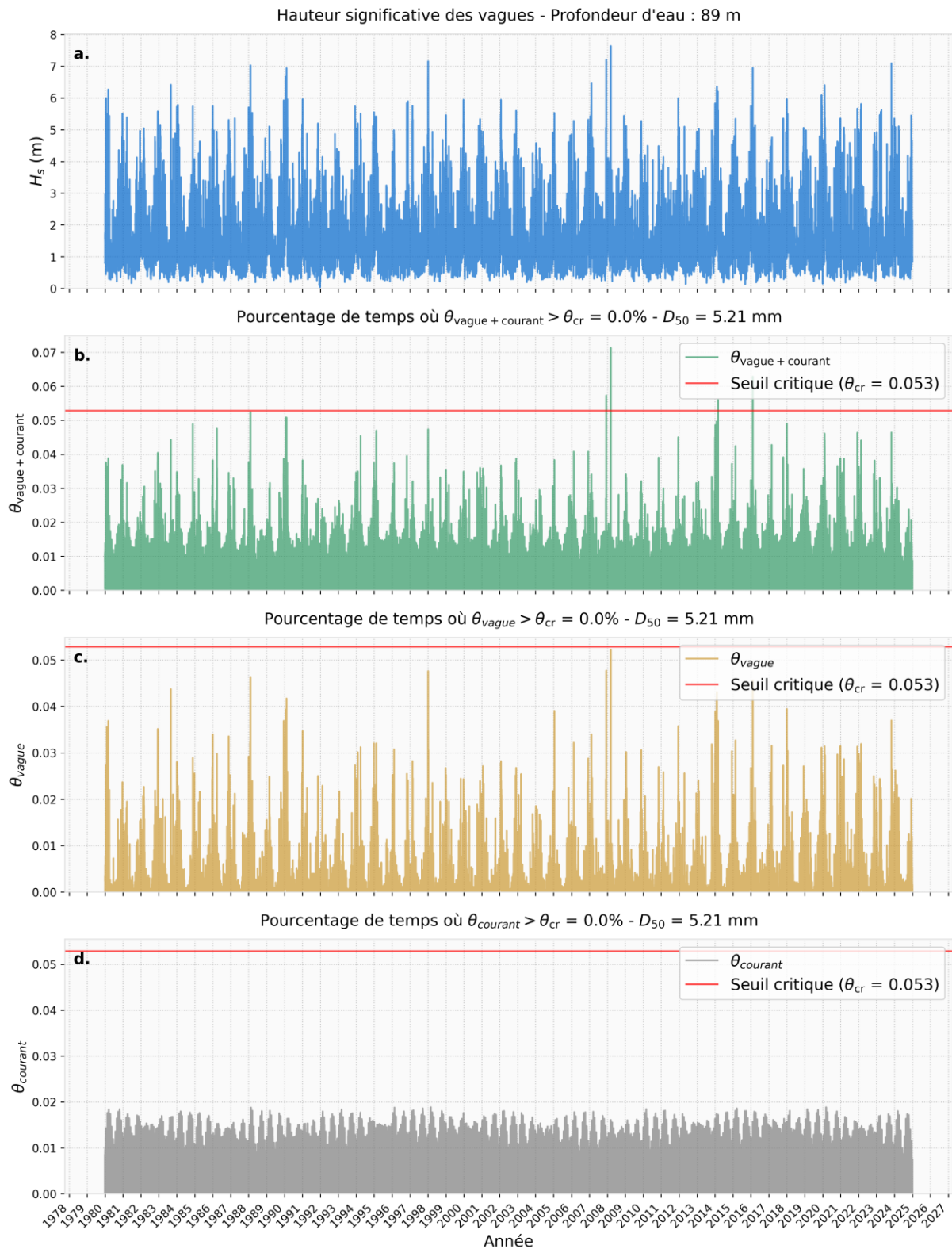
Analyse pour $D_{50} = 5.21$ mm

Figure 59. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

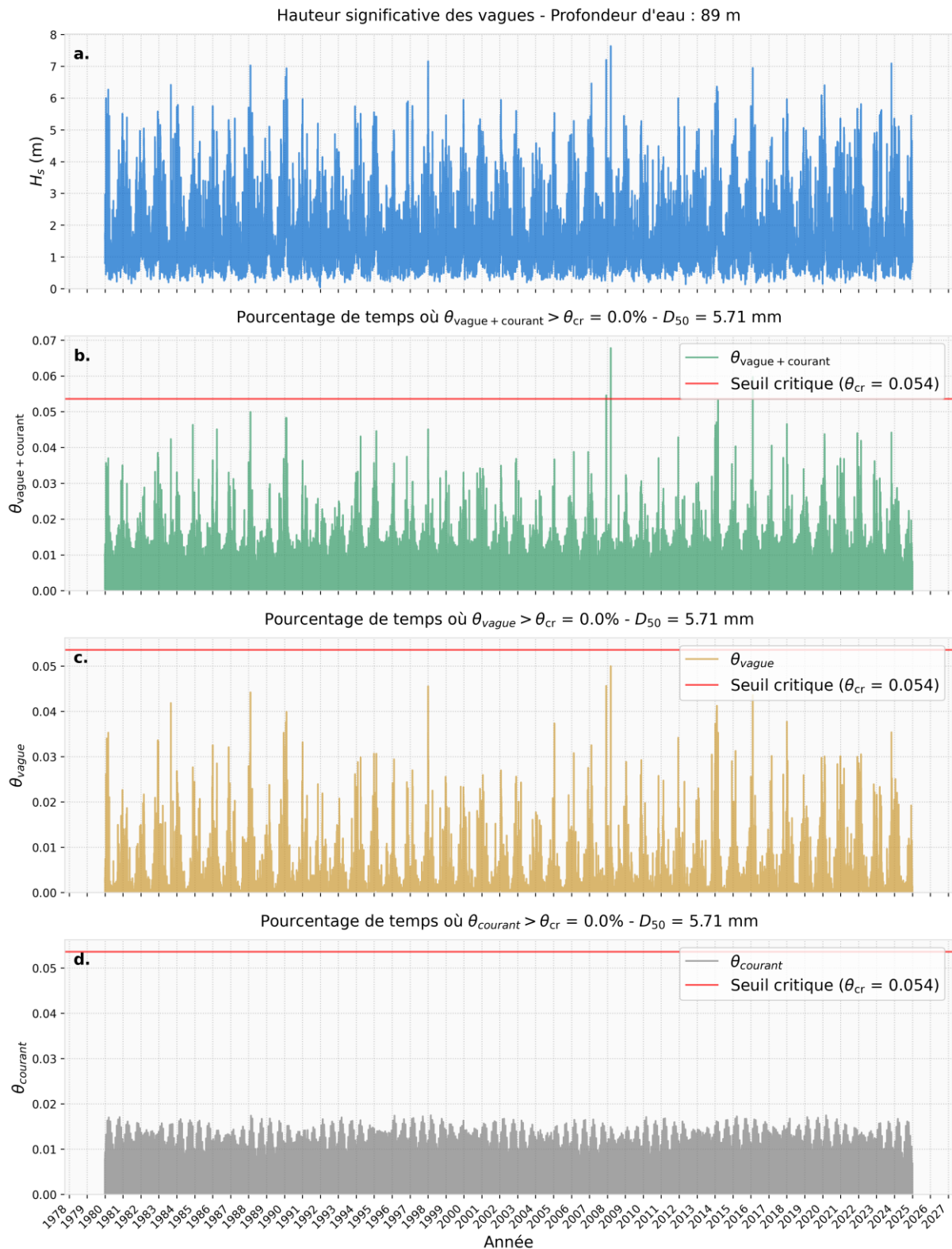
Analyse pour $D_{50} = 5.71$ mm

Figure 60. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P2. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

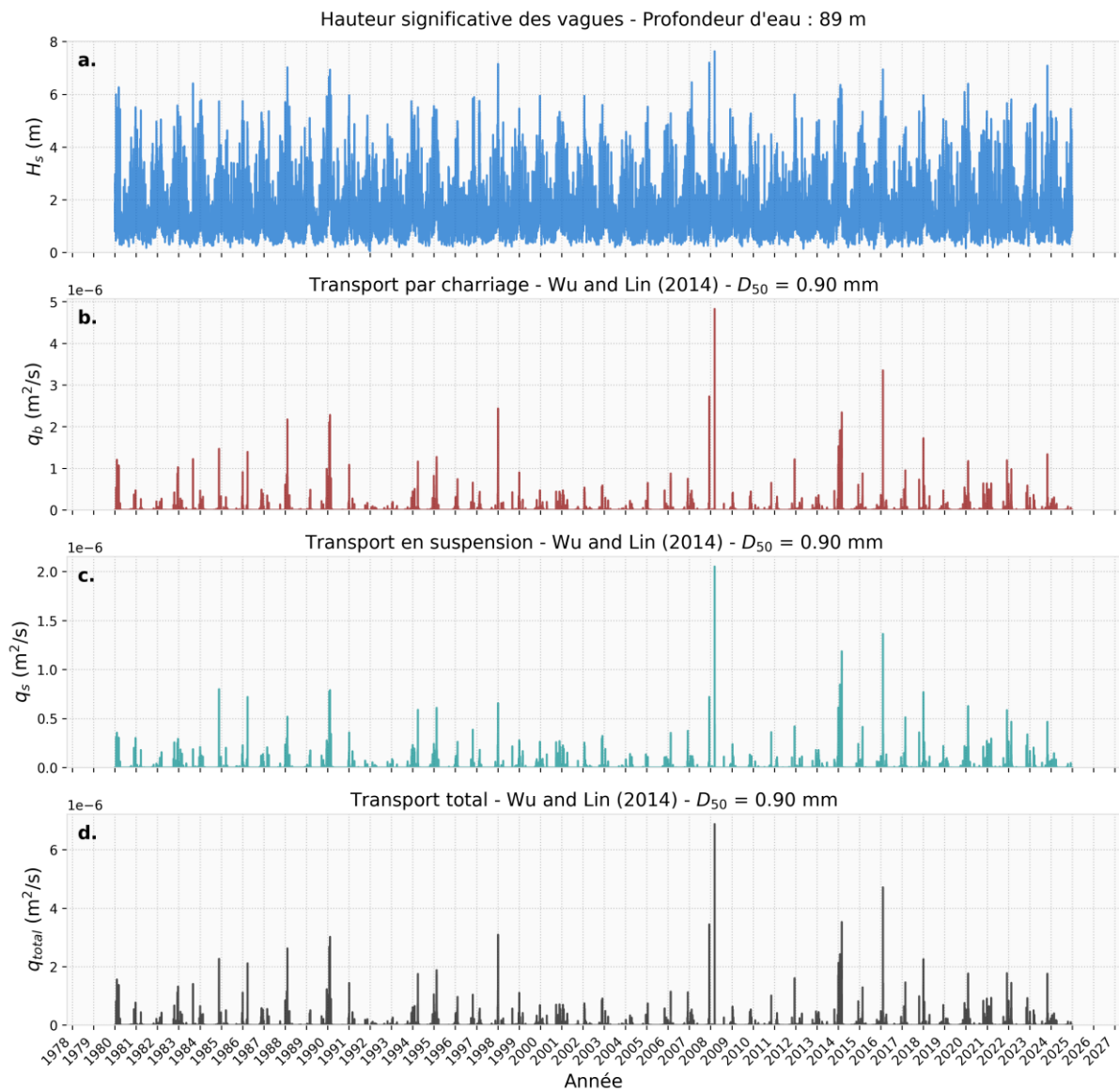
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 61. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

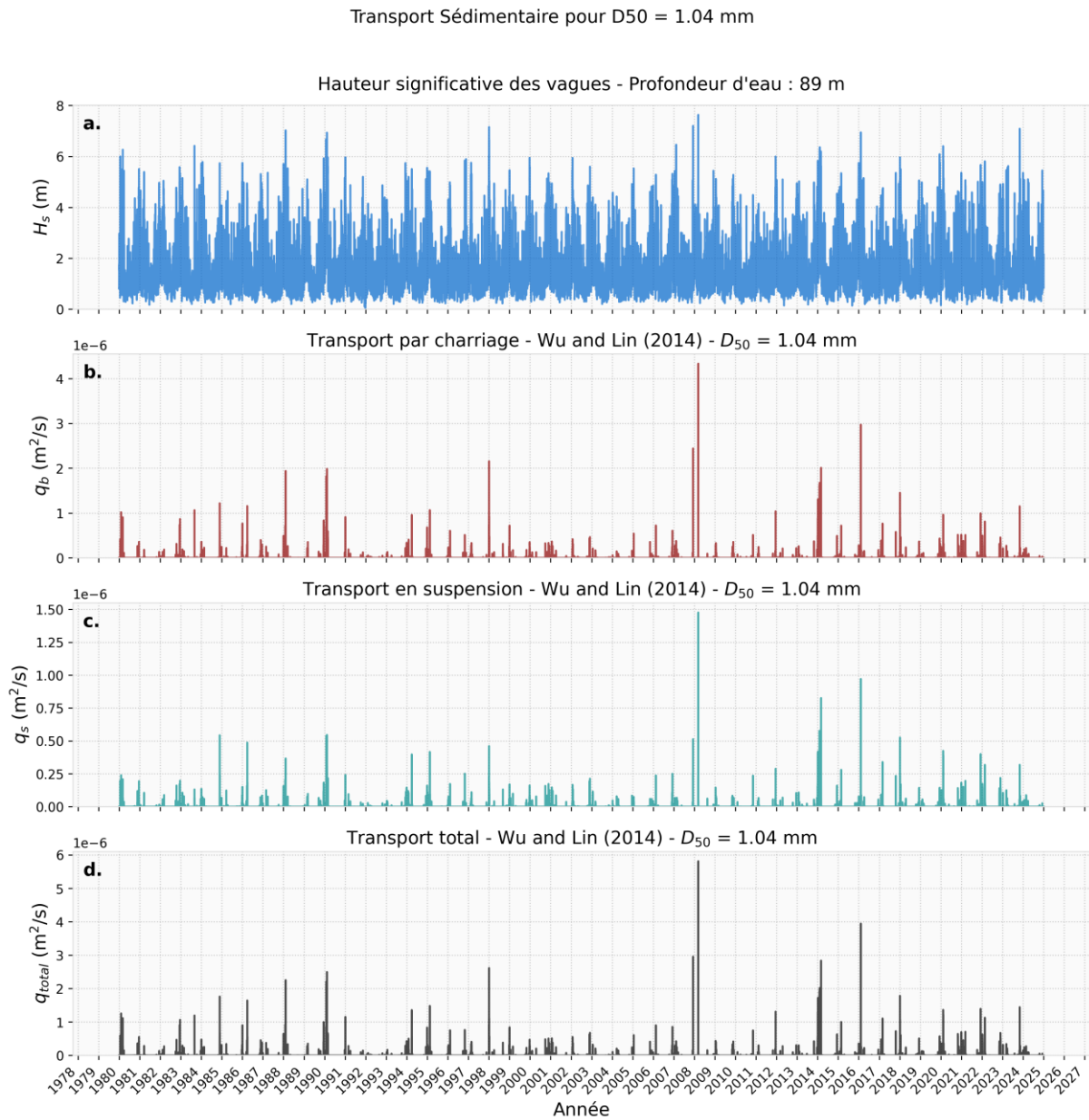


Figure 62. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

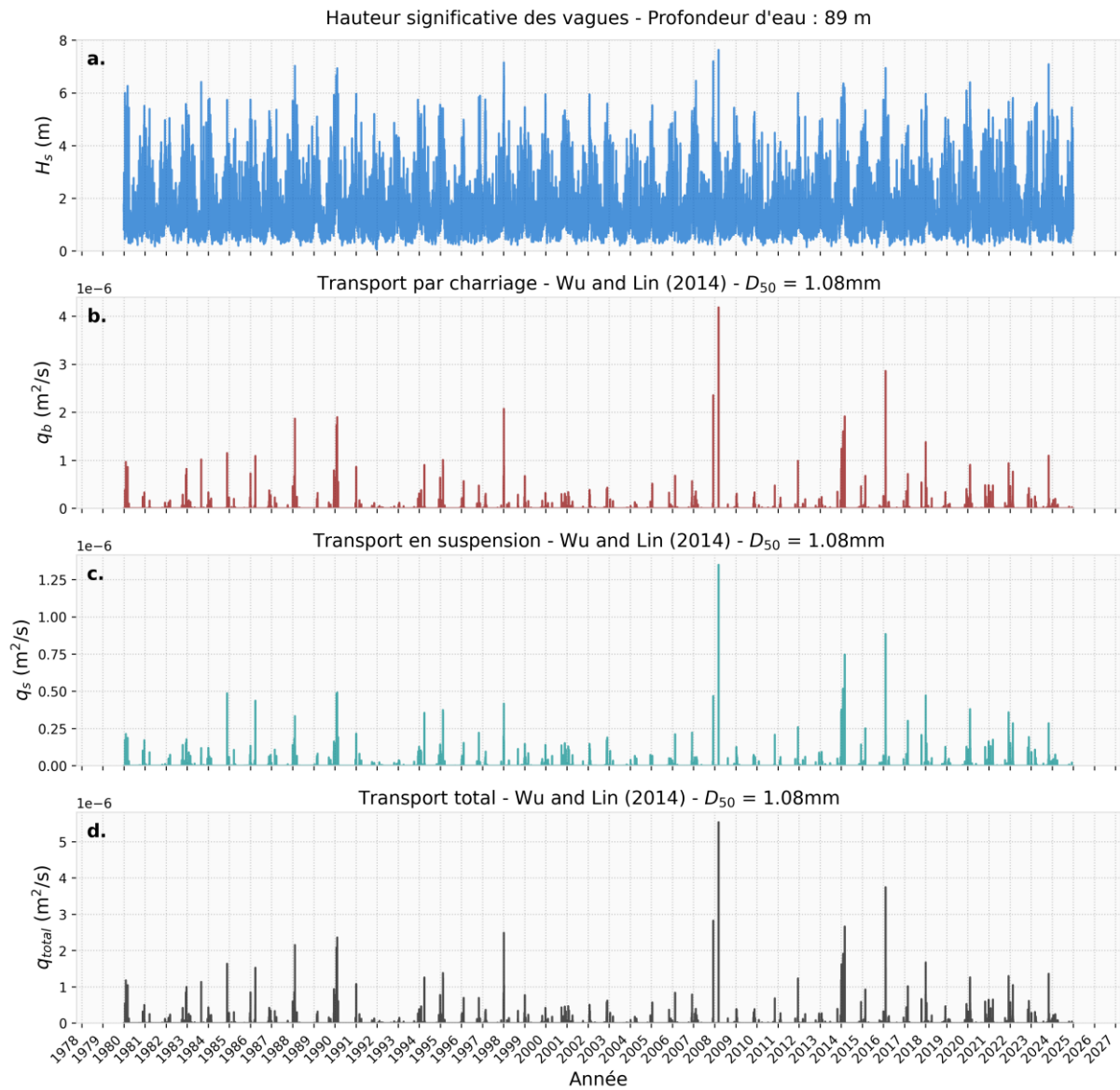
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$ 

Figure 63. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

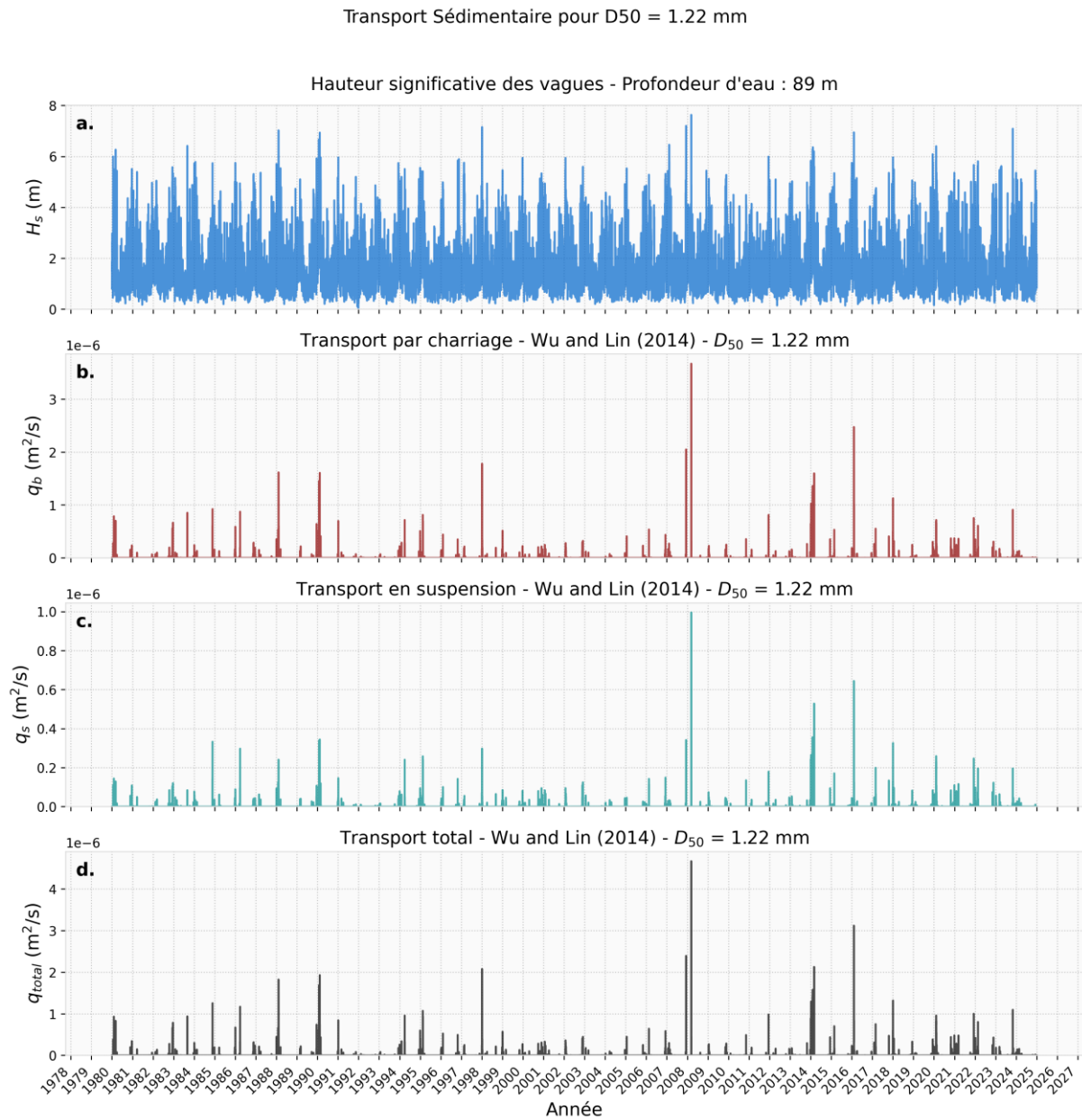


Figure 64. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22 \text{ mm}$ au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 2.38 \text{ mm}$

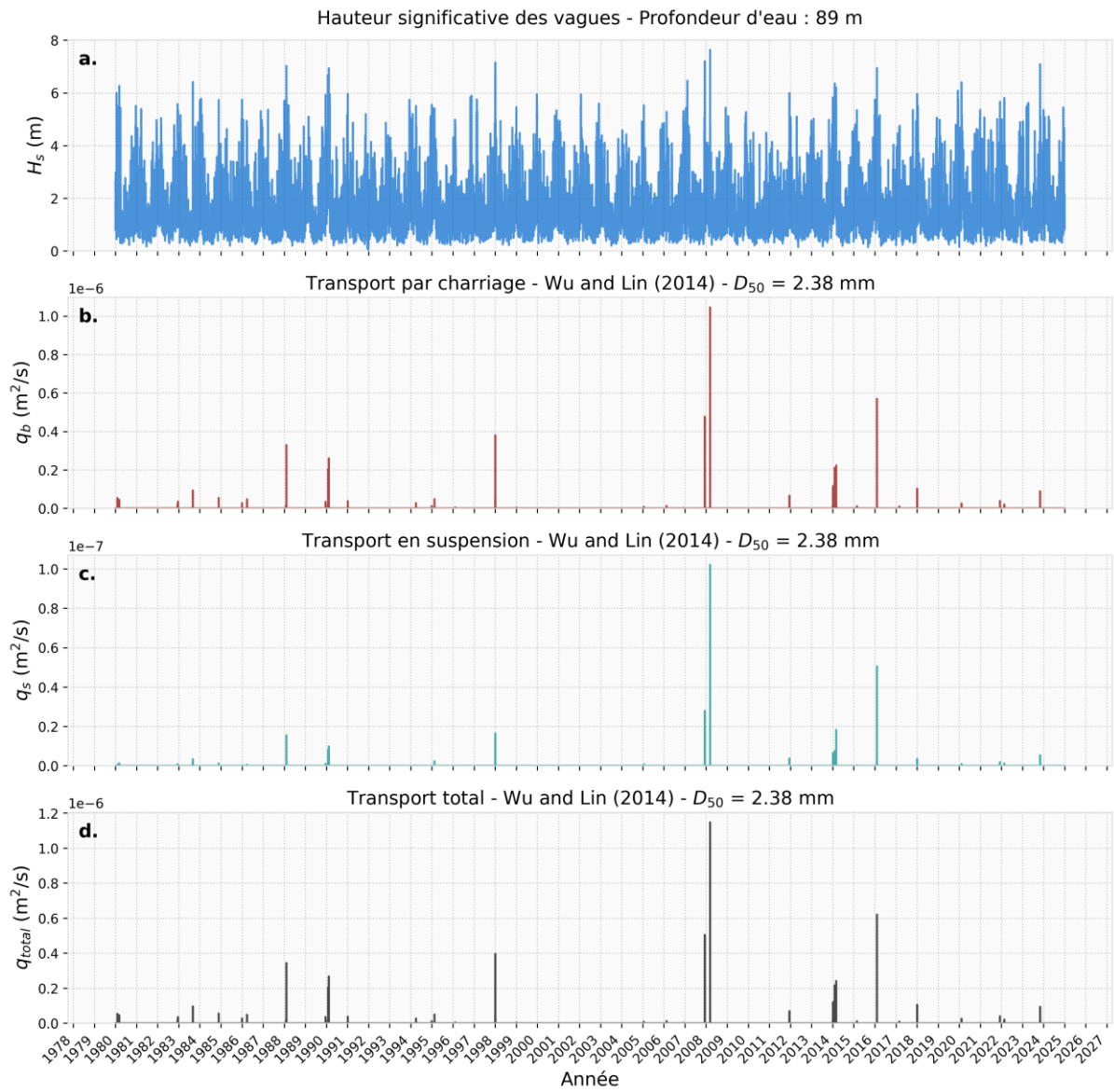


Figure 65. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38 \text{ mm}$ au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

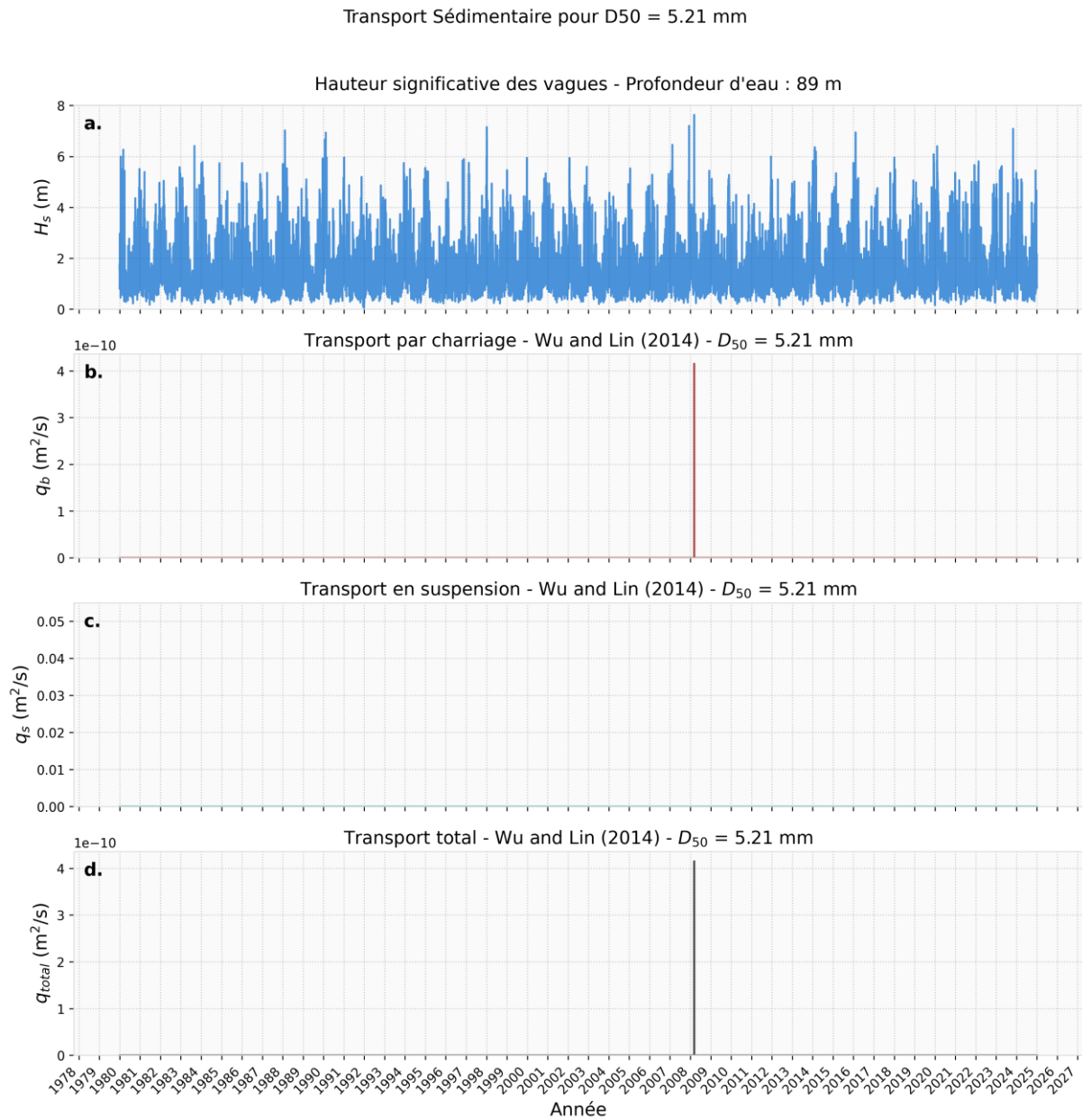


Figure 66. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 5.71 \text{ mm}$

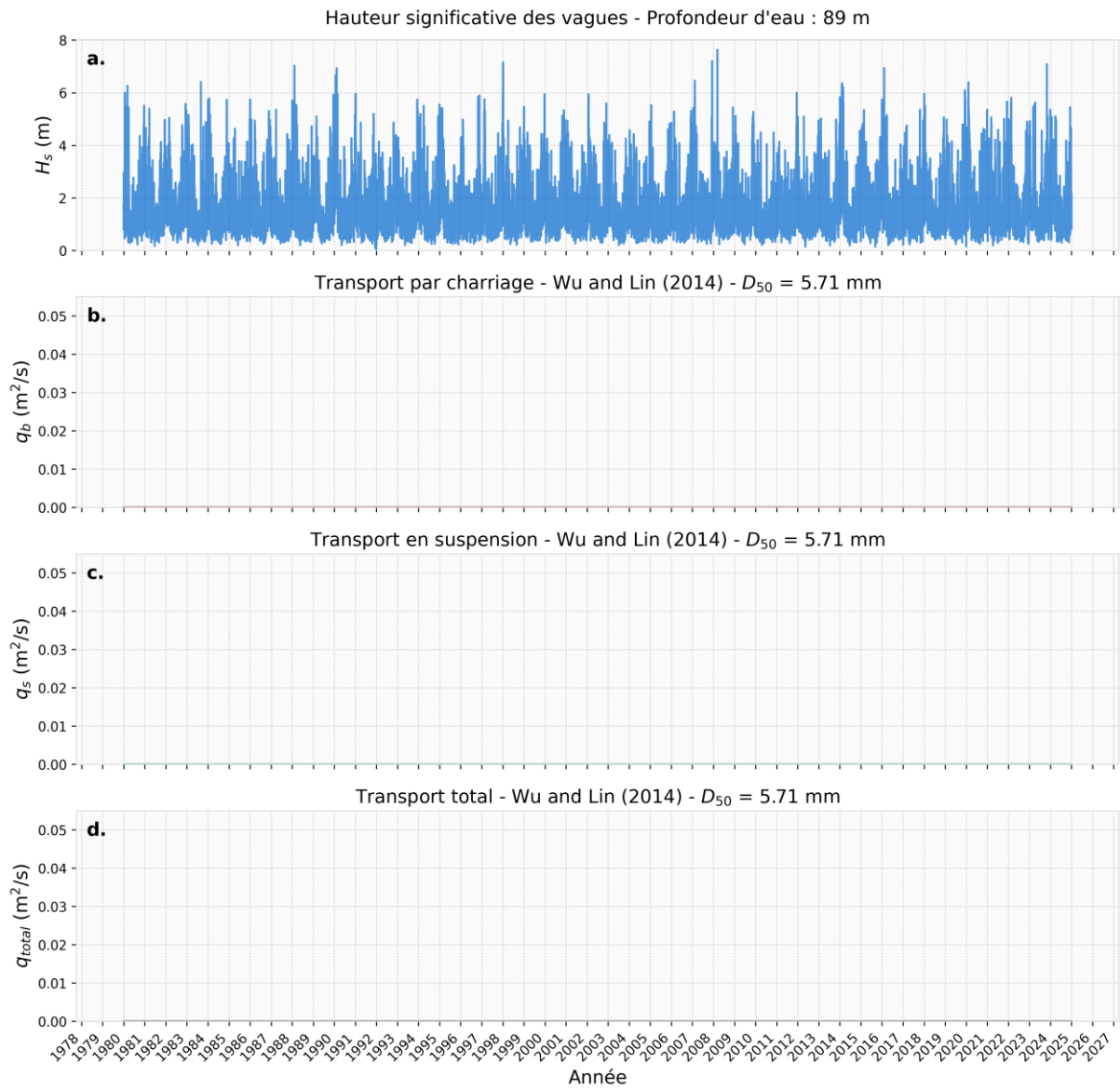


Figure 67. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71 \text{ mm}$ au Point P2. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

7.3 Point P3

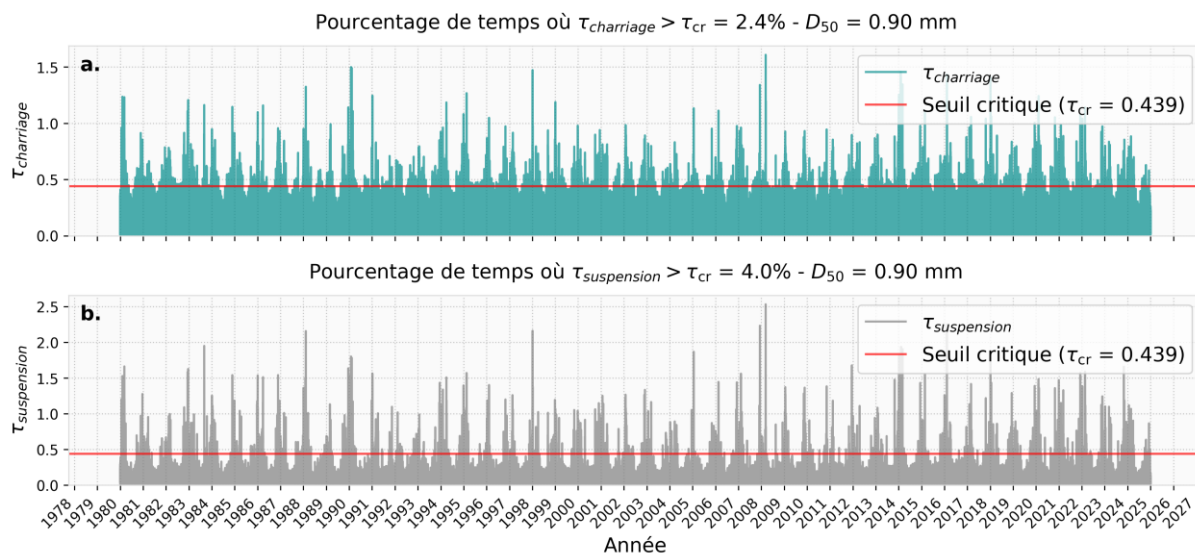
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 68. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

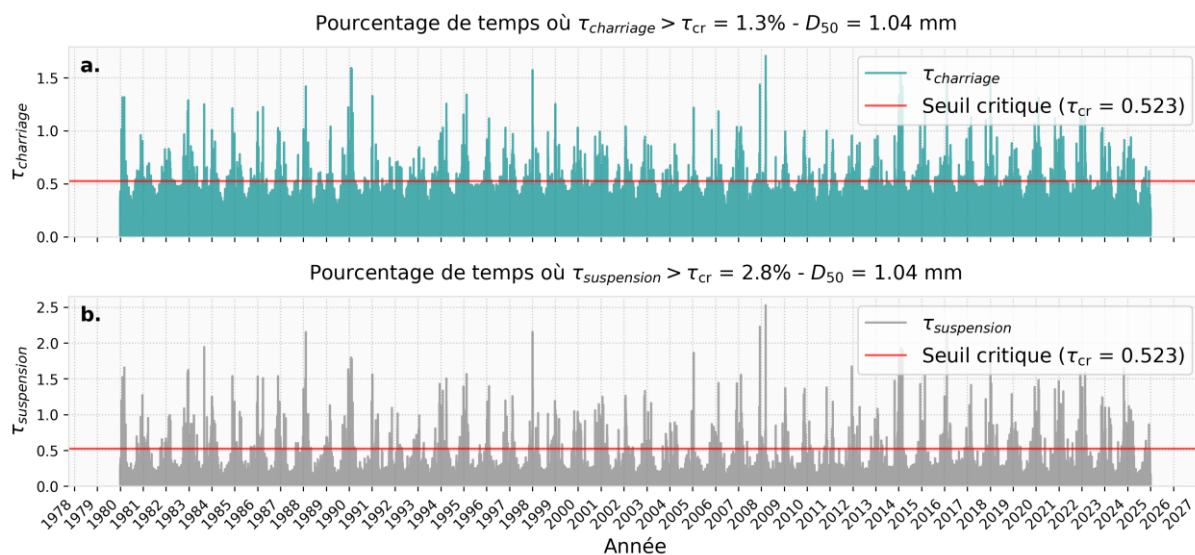
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.04$ mm

Figure 69. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

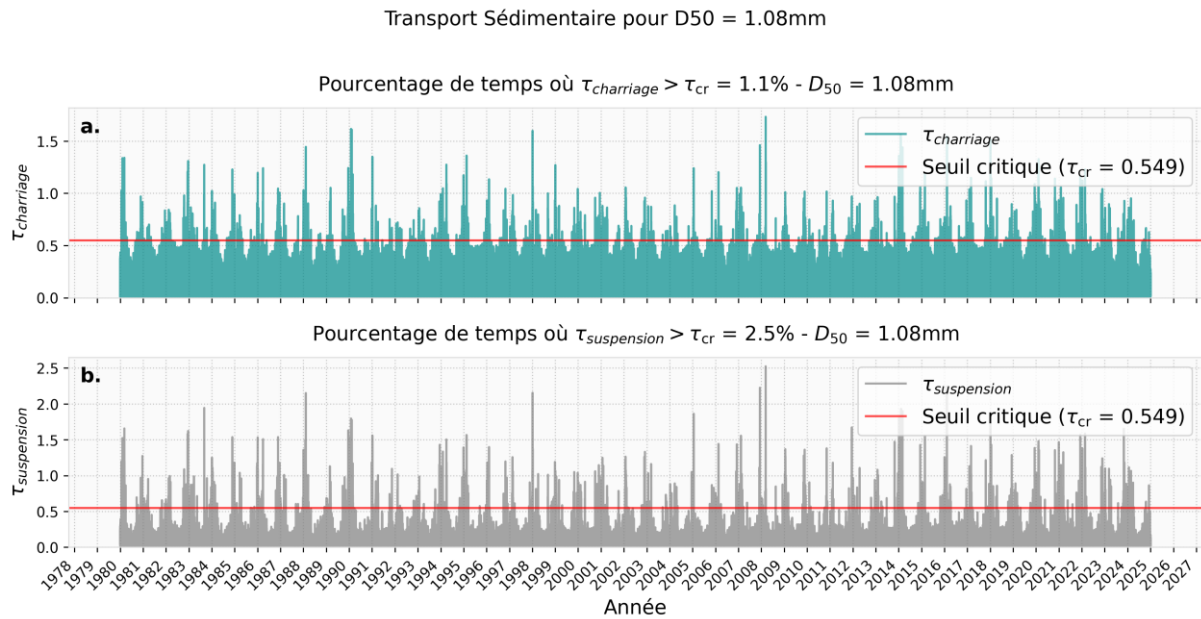


Figure 70. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

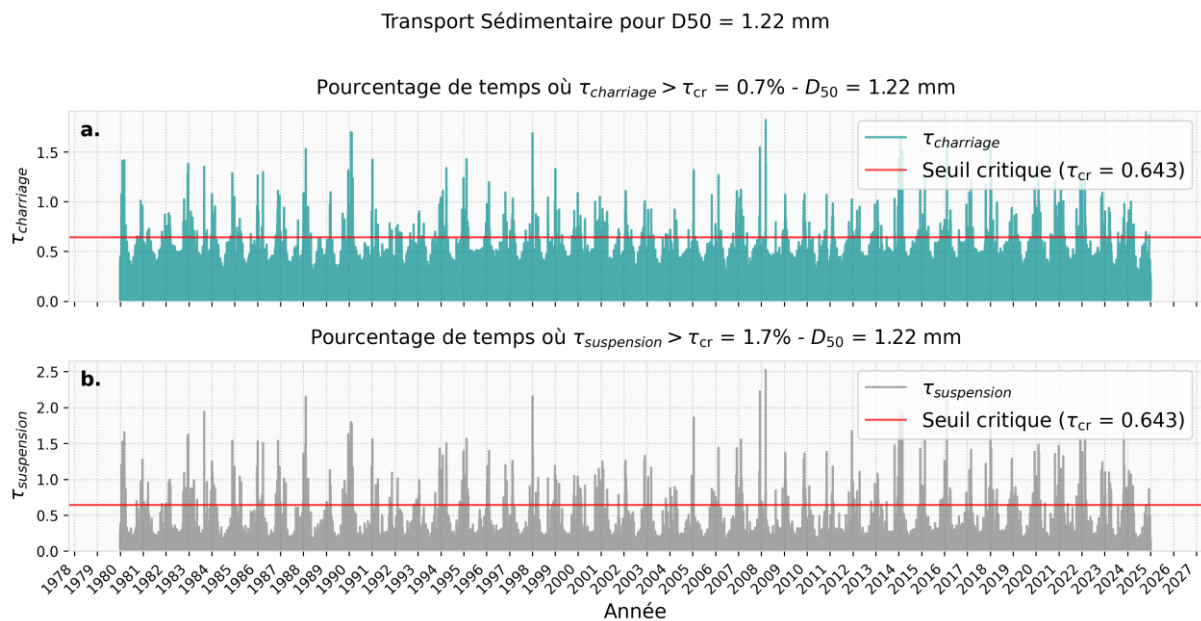


Figure 71. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22\text{ mm}$ au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

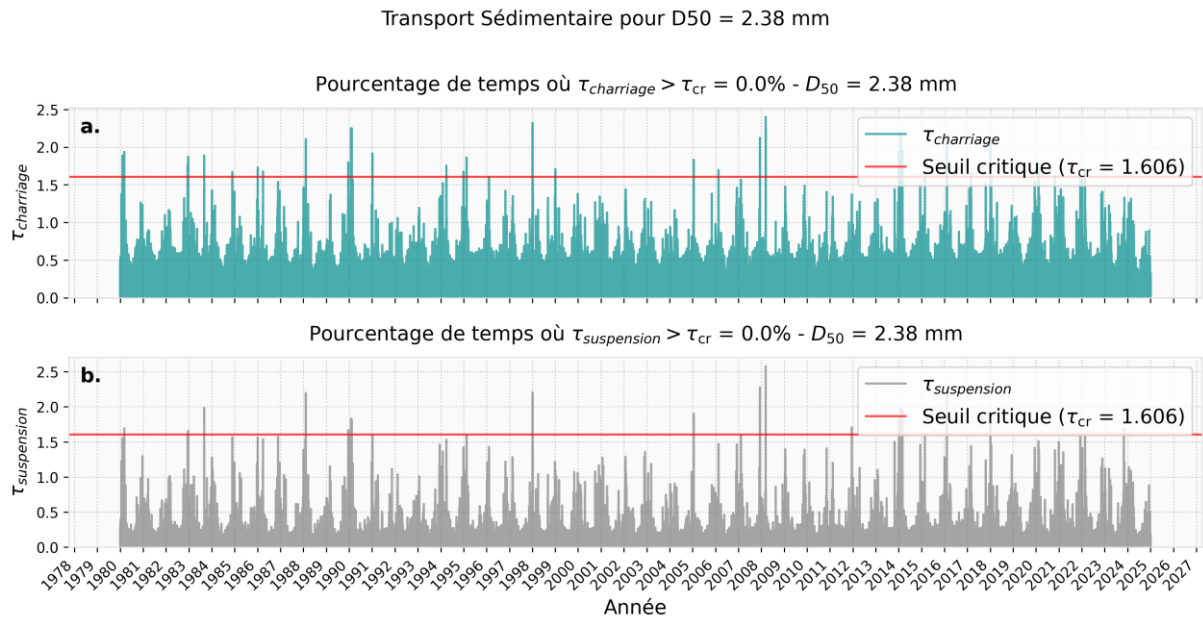


Figure 72. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

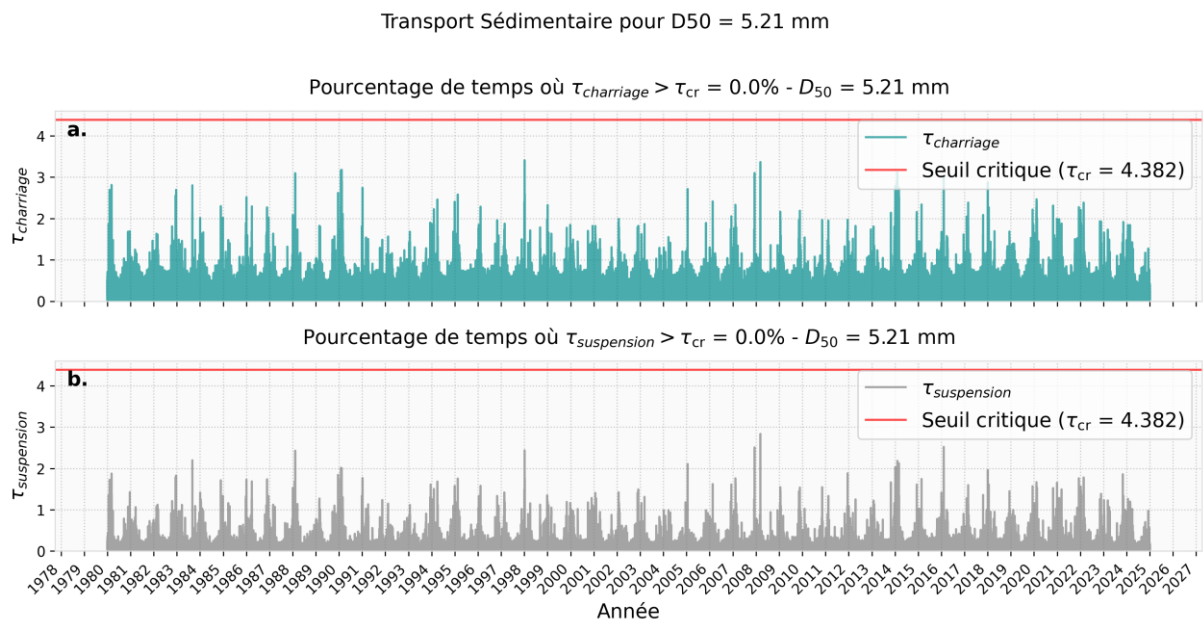


Figure 73. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

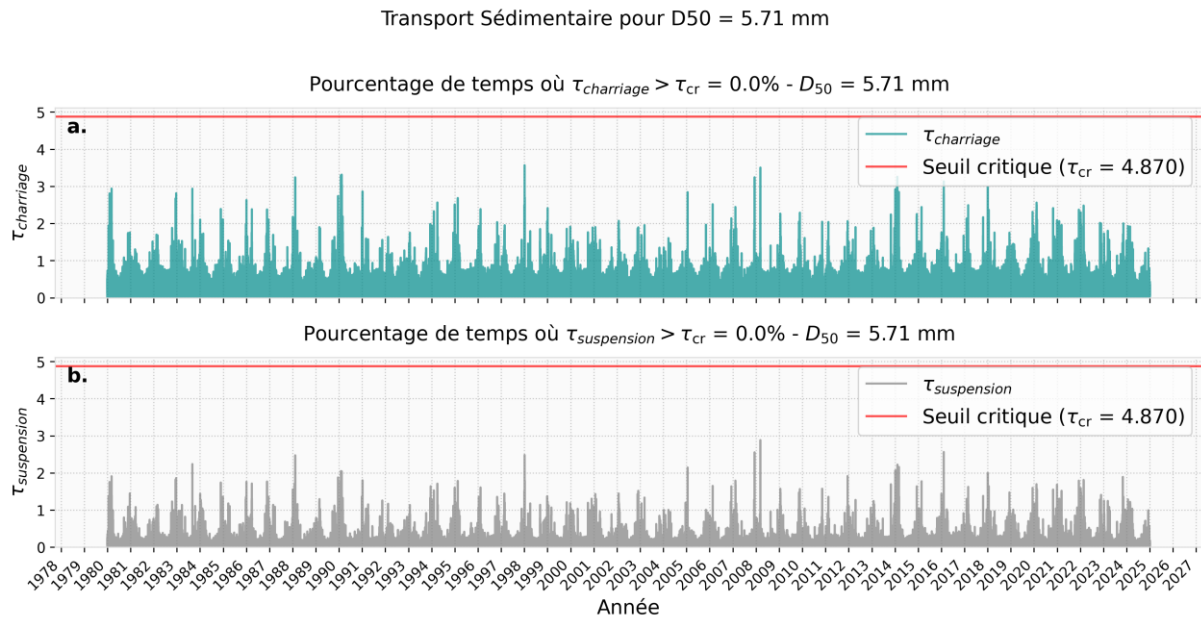


Figure 74. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P3. **a.** Contrainte de charriage selon la méthode de Wu & Lin (2014), **b.** Contrainte de suspension selon la méthode de Wu & Lin (2014).

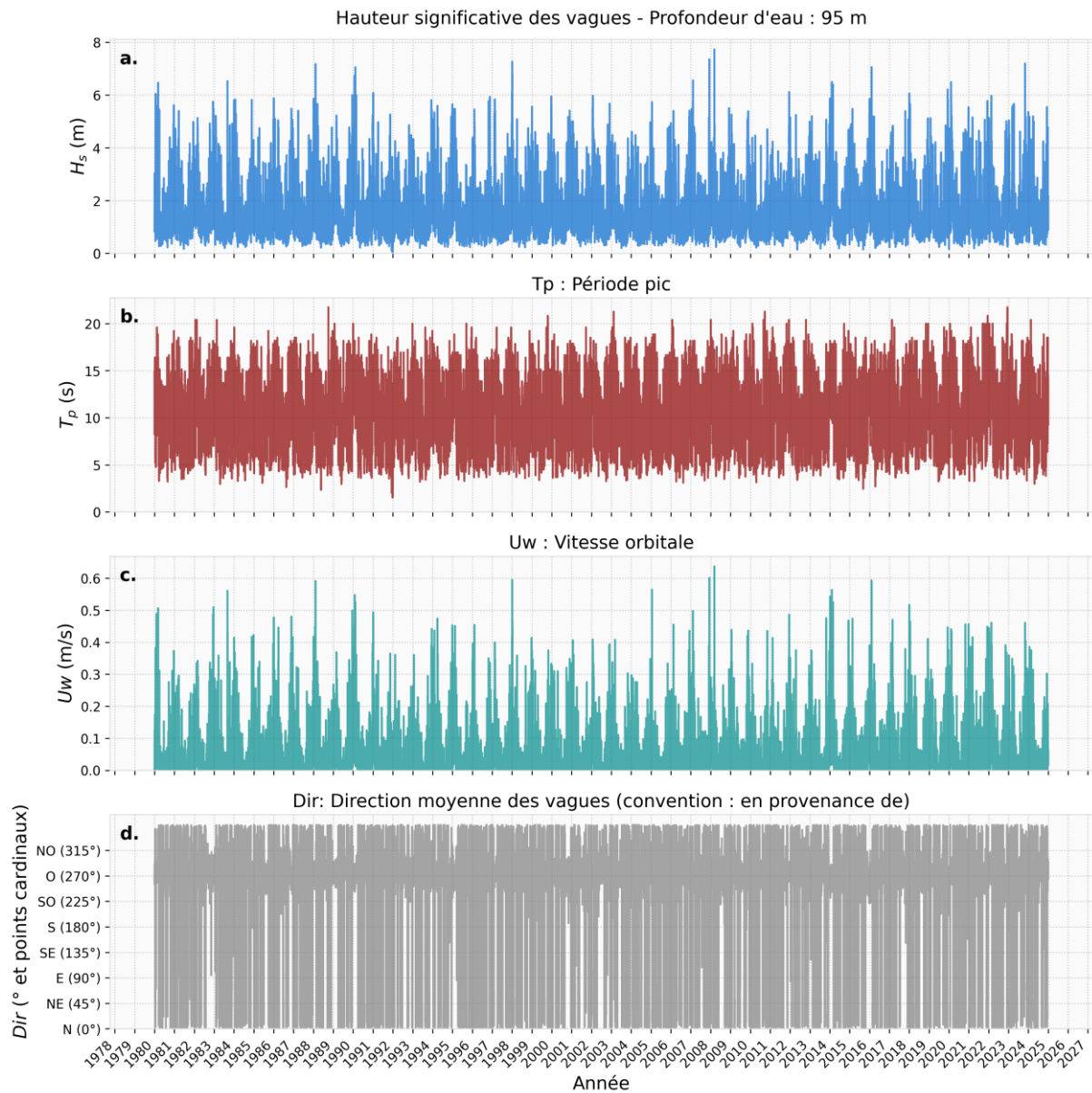


Figure 75. Séries temporelles extraites au Point P3, sur la période 1980–2024. **a.** Hauteur significative des vagues, **b.** Période pic, **c.** Vitesse orbitale, **d.** Direction moyenne des vagues (en degrés et points cardinaux).

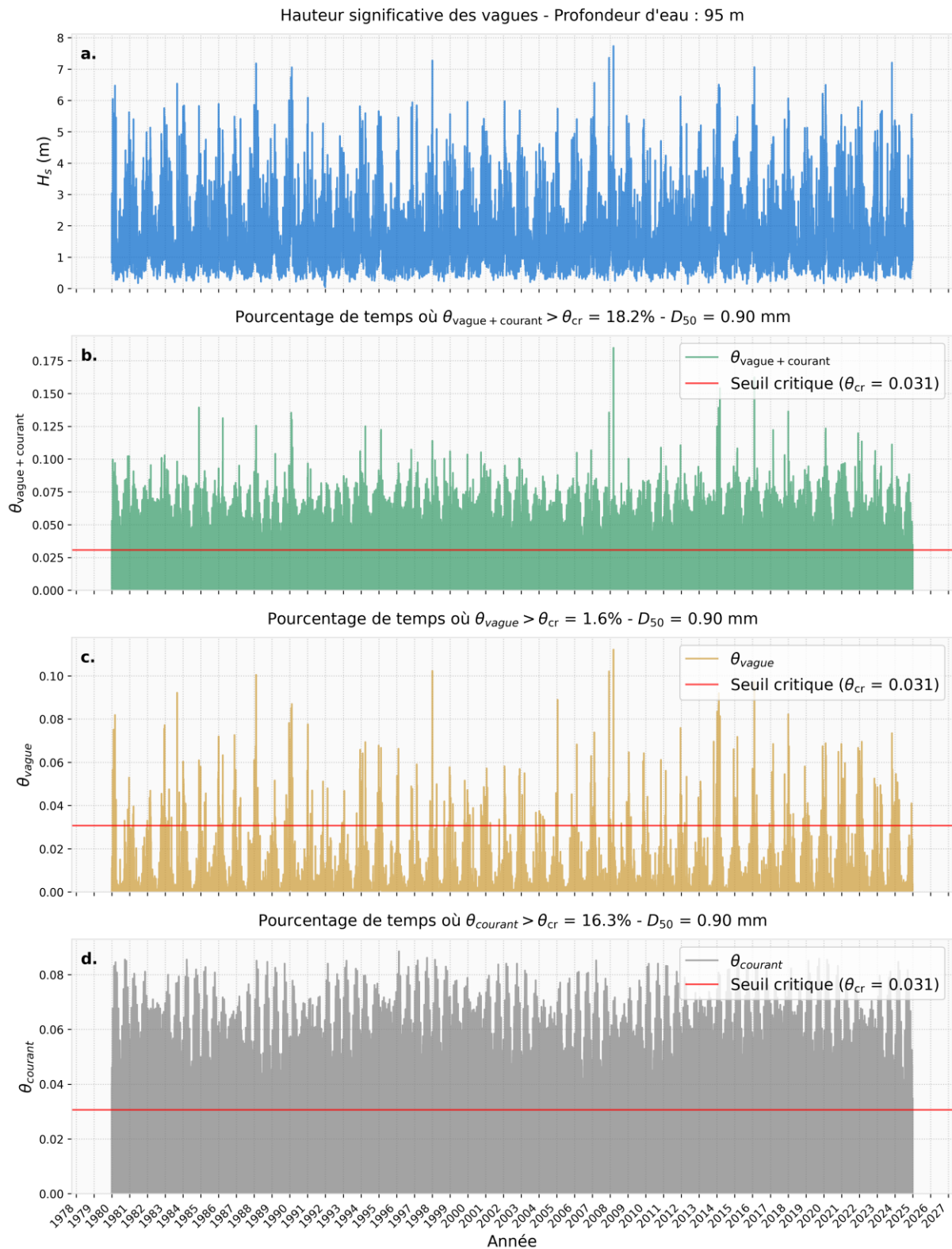
Analyse pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 76. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

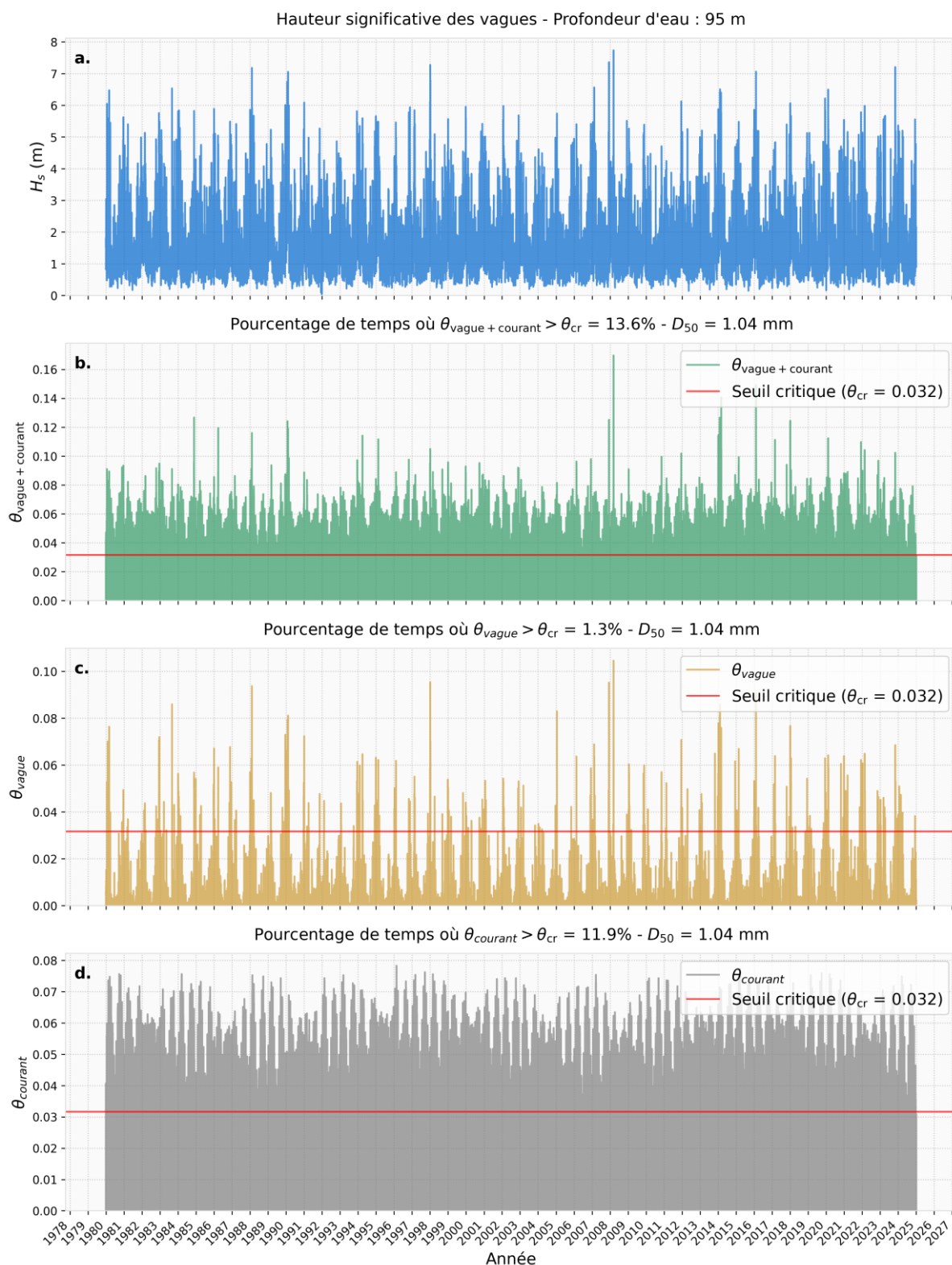
Analyse pour $D_{50} = 1.04$ mm

Figure 77. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

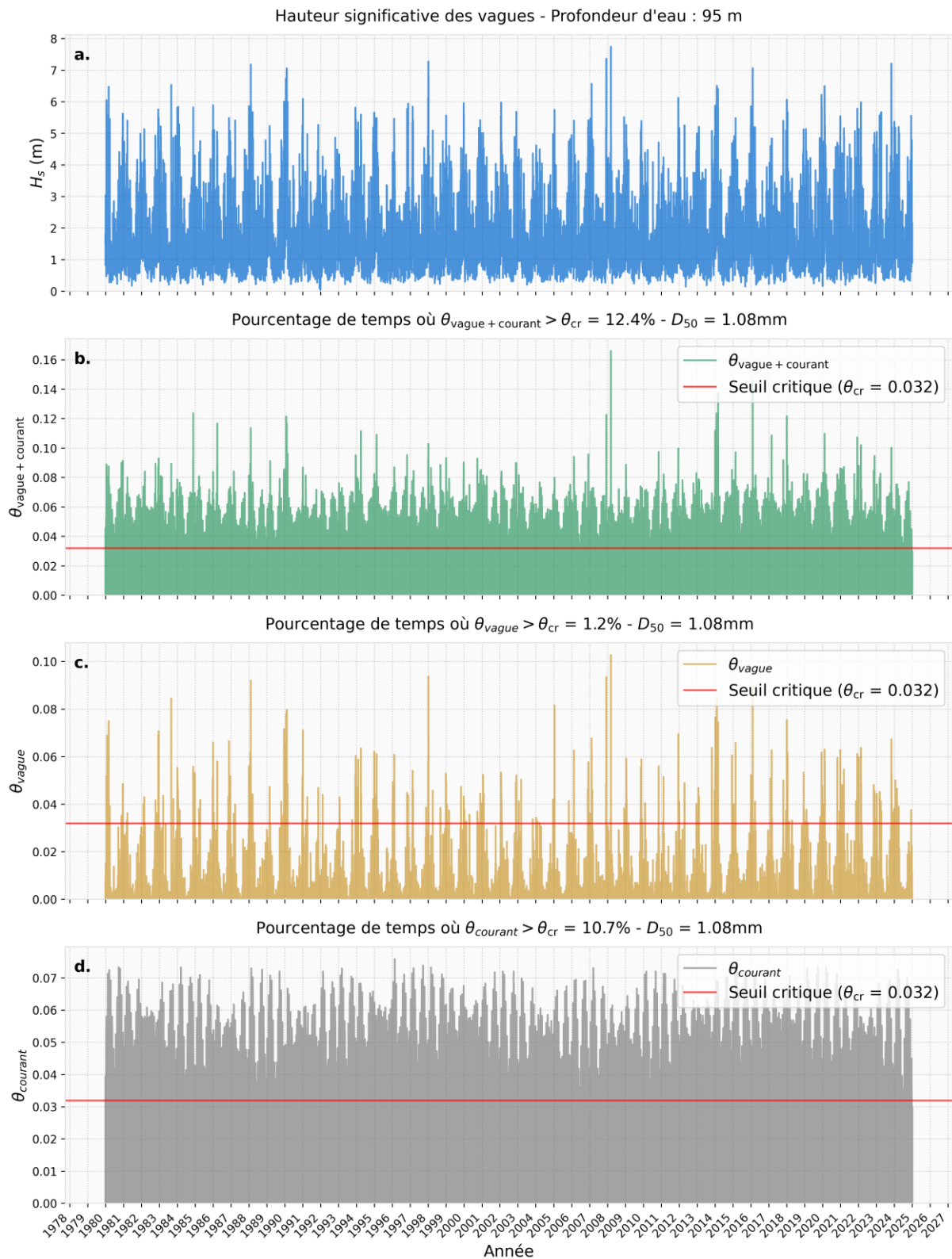
Analyse pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$ 

Figure 78. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

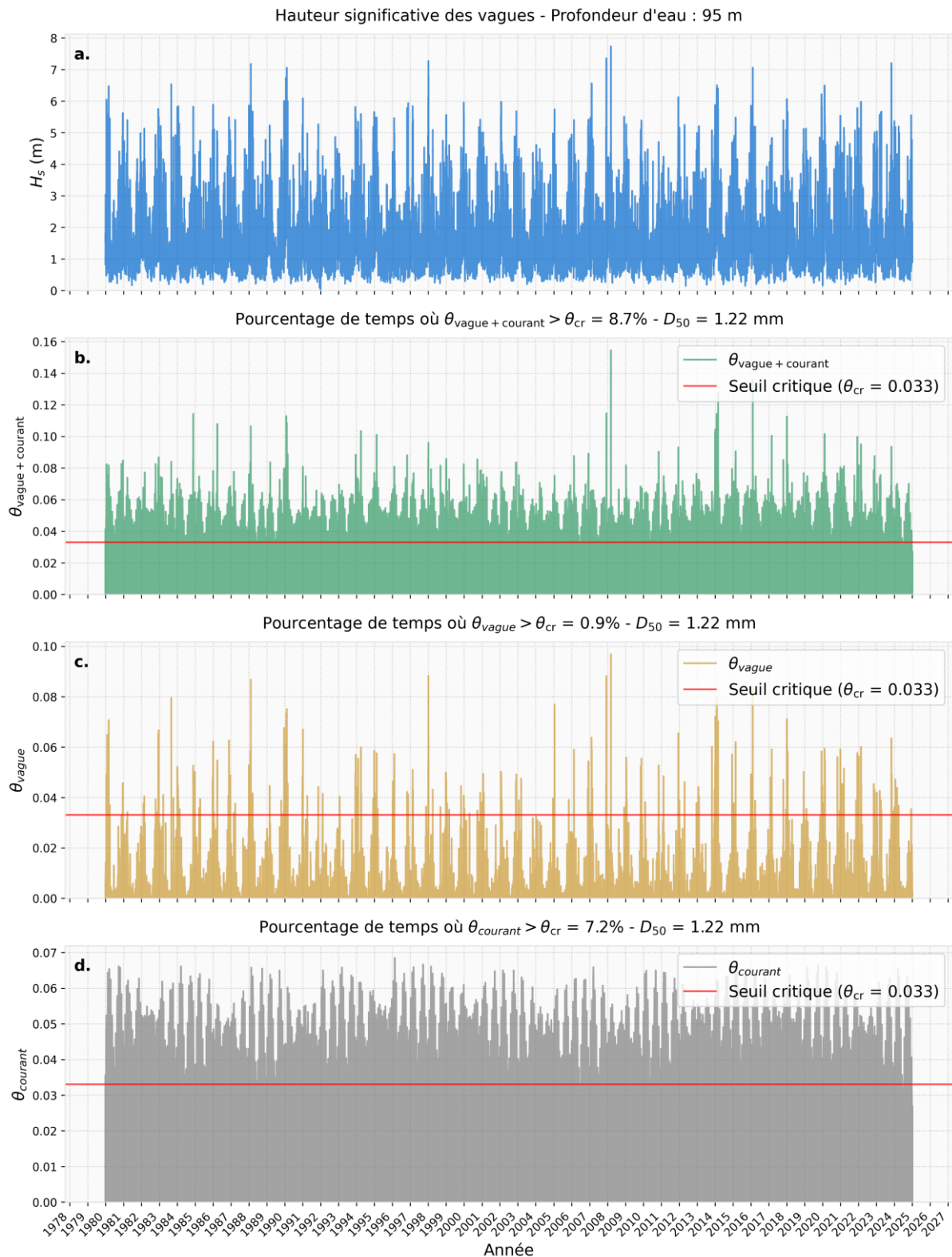
Analyse pour $D_{50} = 1.22$ mm

Figure 79. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

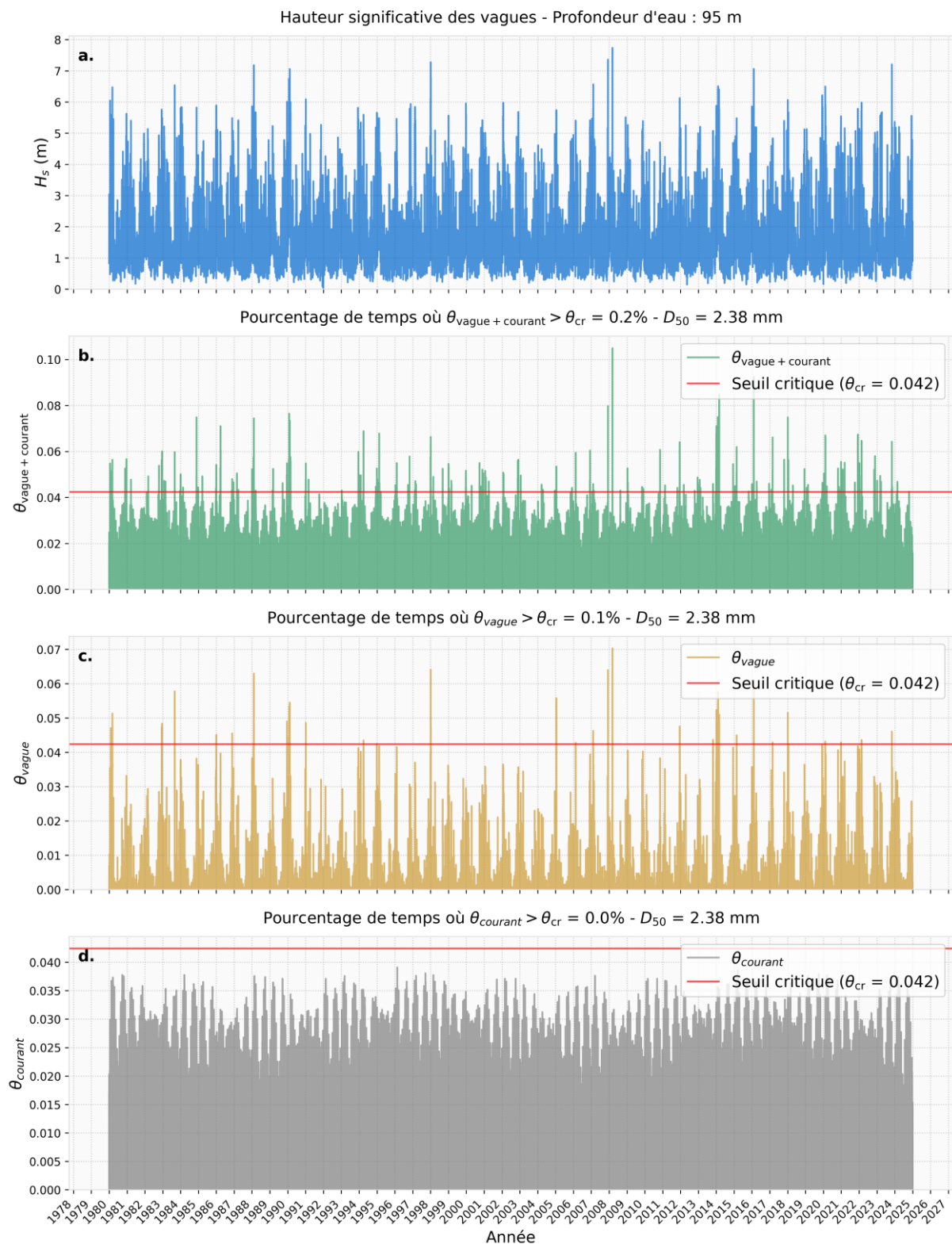
Analyse pour $D_{50} = 2.38$ mm

Figure 80. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

Analyse pour $D_{50} = 5.21$ mm

Figure 81. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

Analyse pour $D_{50} = 5.71$ mm

Figure 82. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P3. **a.** Hauteur significative des vagues (H_s), **b.** Paramètre de Shields total ($\theta_{\text{vague} + \text{courant}}$), **c.** Paramètre de Shields associé aux vagues (θ_{vague}), **d.** Paramètre de Shields associé au courant (θ_{courant}).

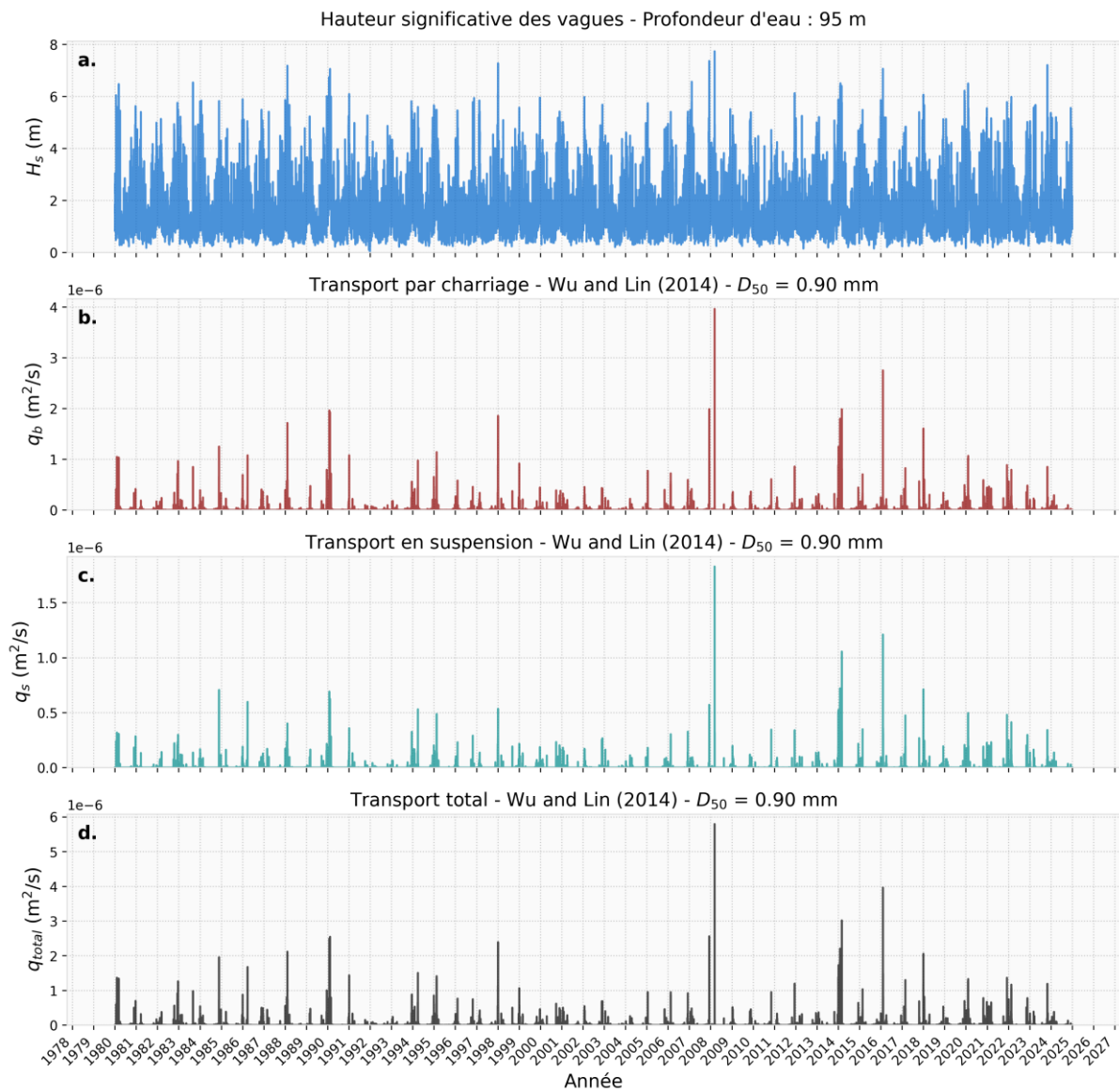
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 0.90$ mm

Figure 83. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 0.90$ mm au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

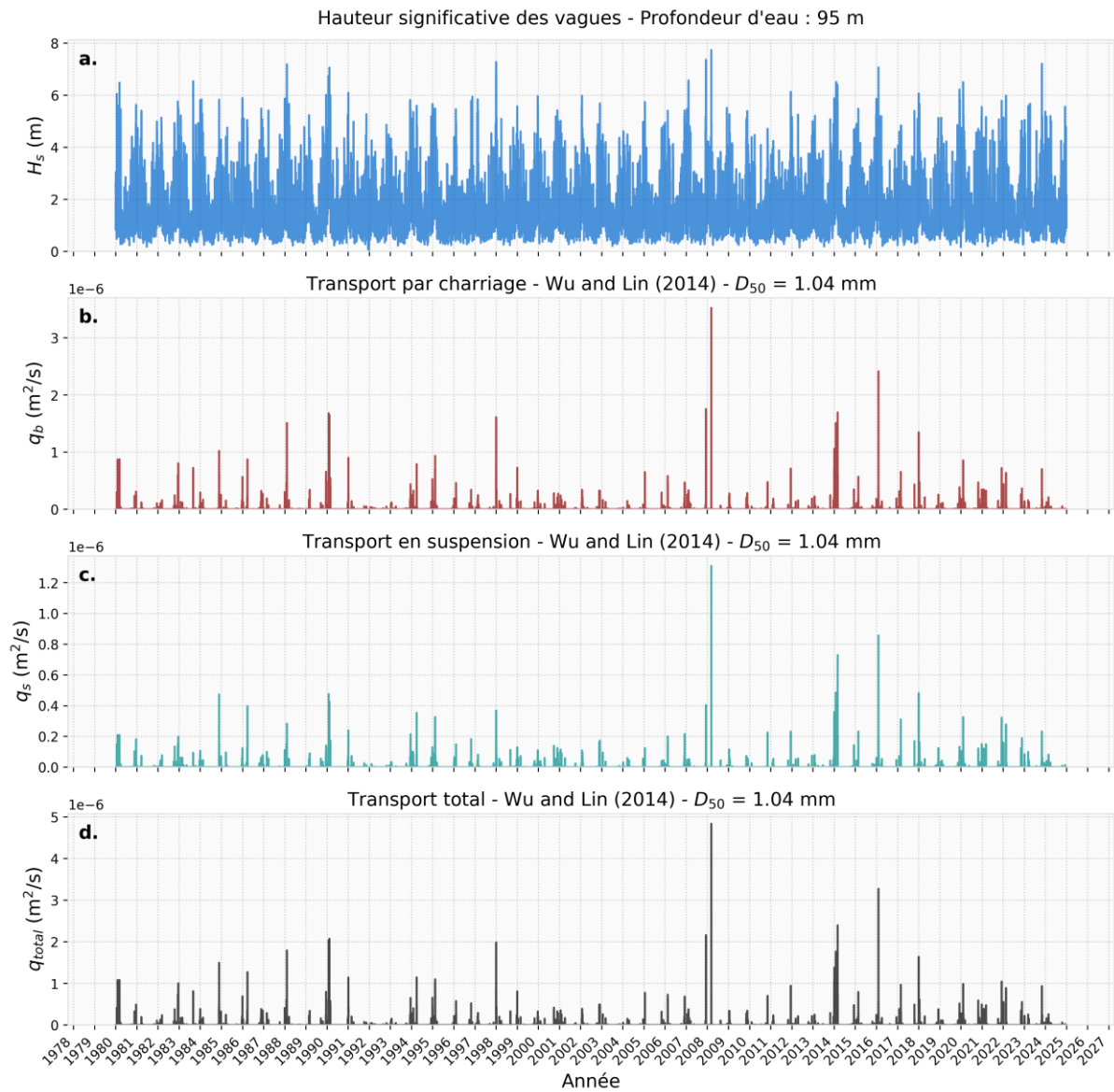
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.04$ mm

Figure 84. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.04$ mm au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

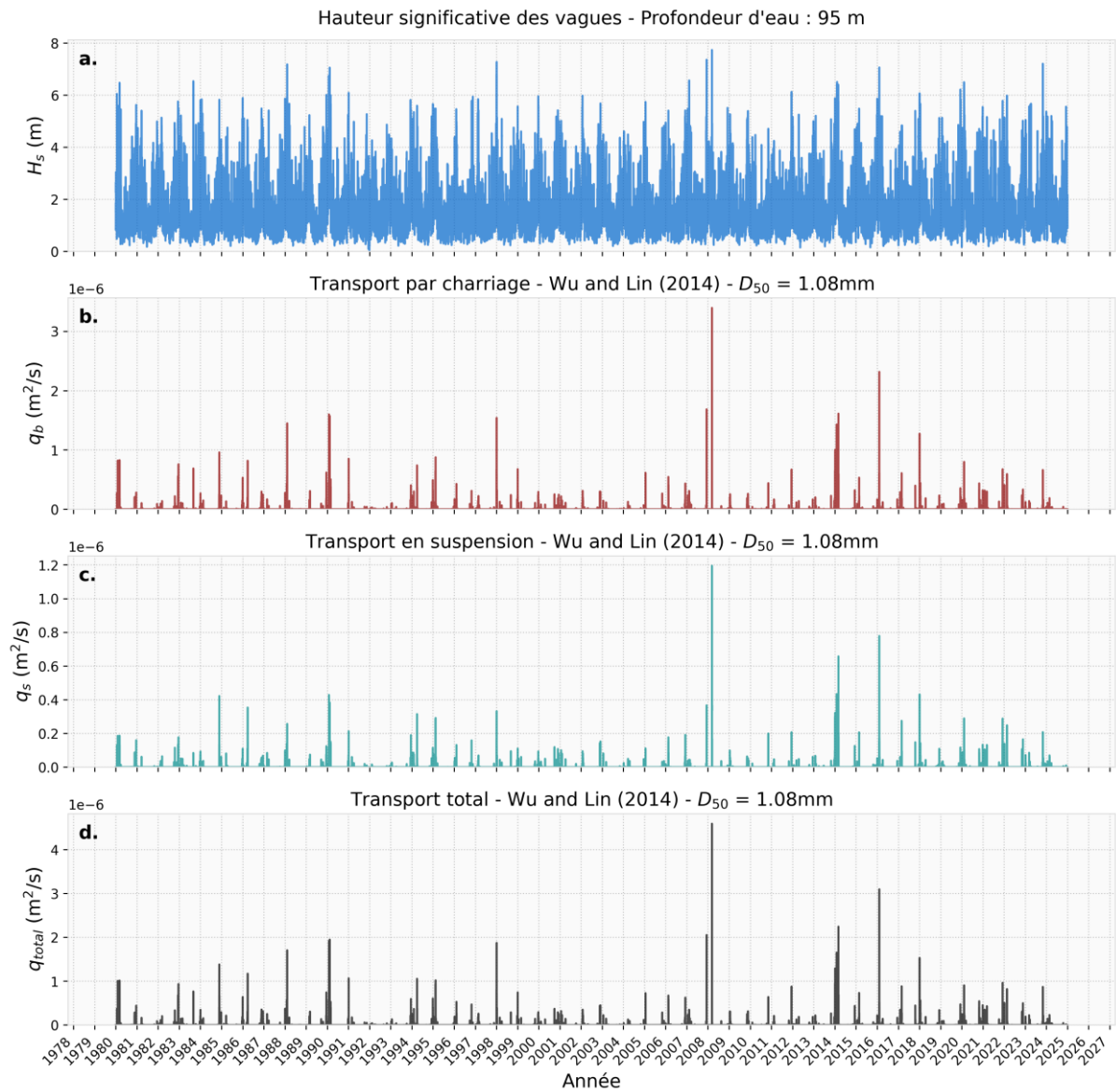
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.08\text{mm}$ 

Figure 85. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.08\text{ mm}$ au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

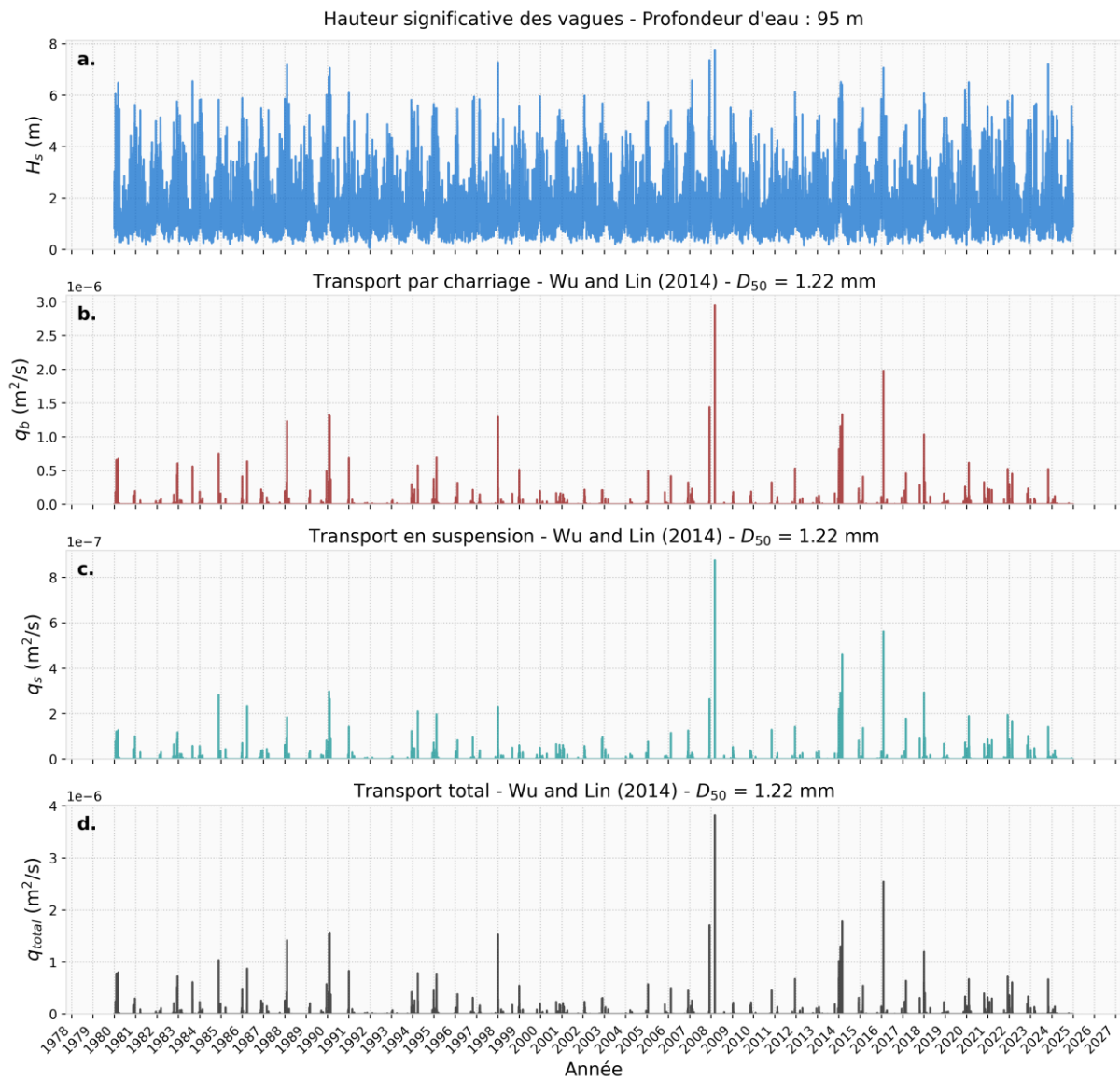
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 1.22$ mm

Figure 86. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 1.22$ mm au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

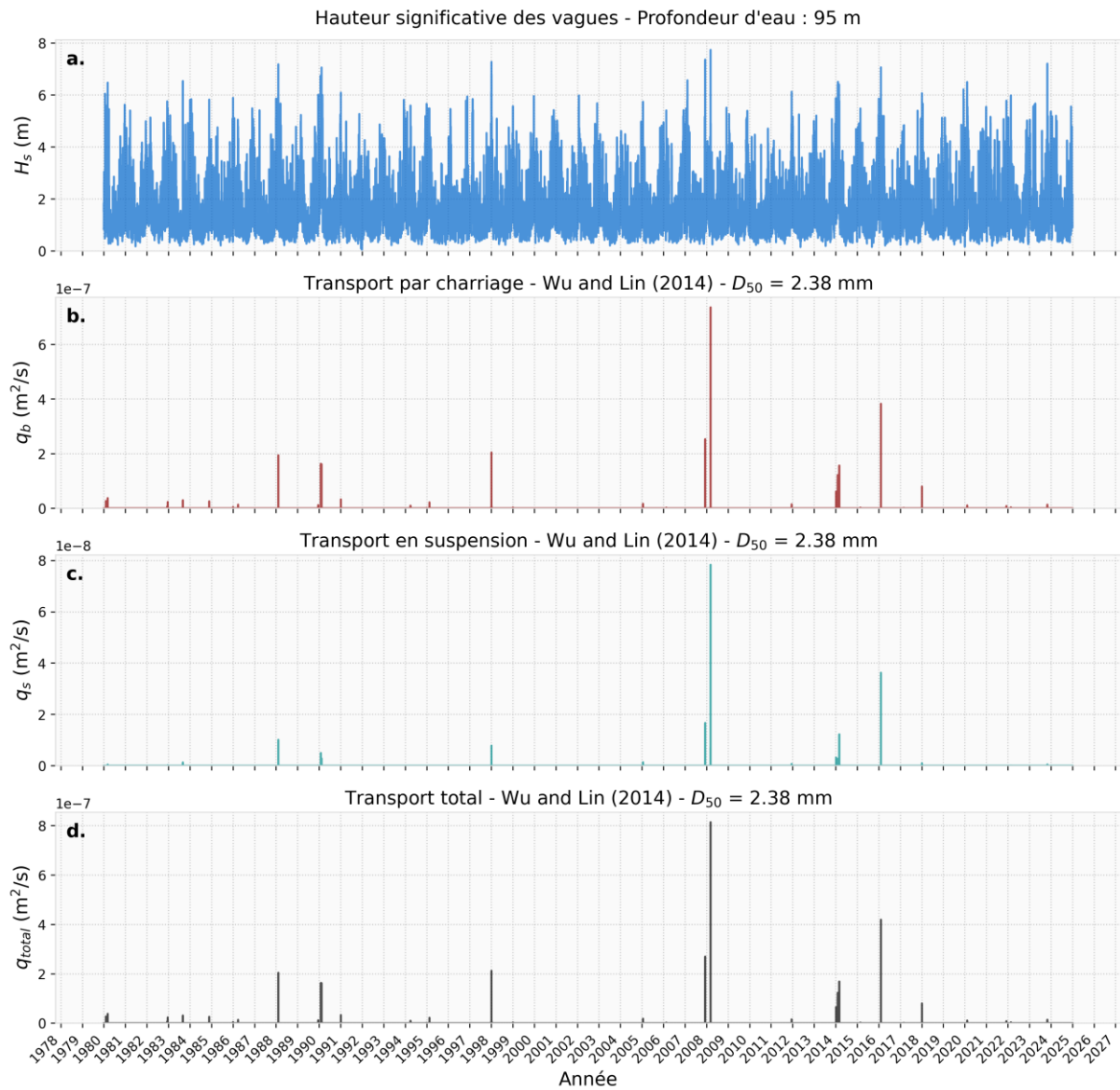
Transport Sédimentaire pour $D_{50} = 2.38$ mm

Figure 87. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 2.38$ mm au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

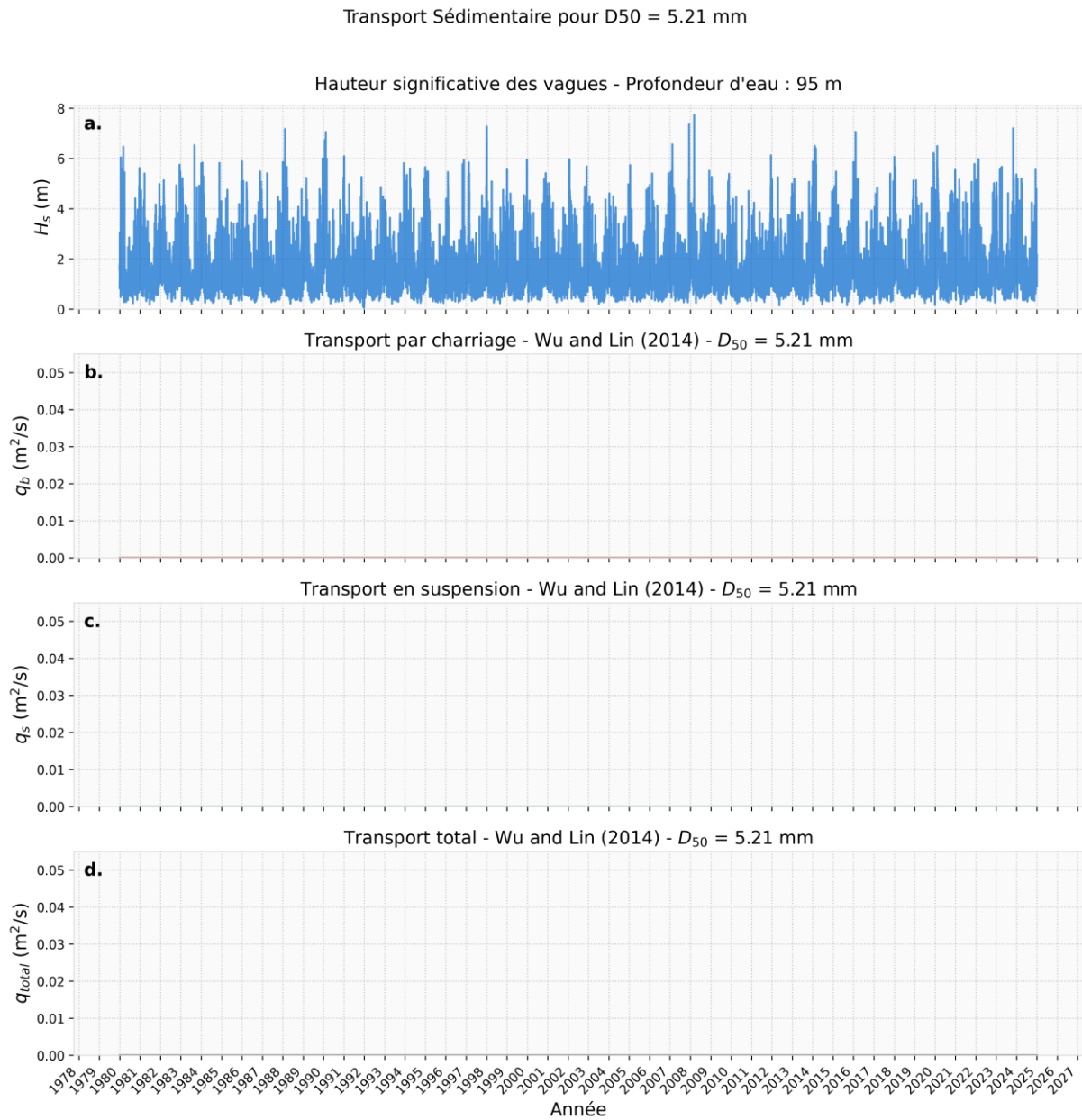


Figure 88. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.21$ mm au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).

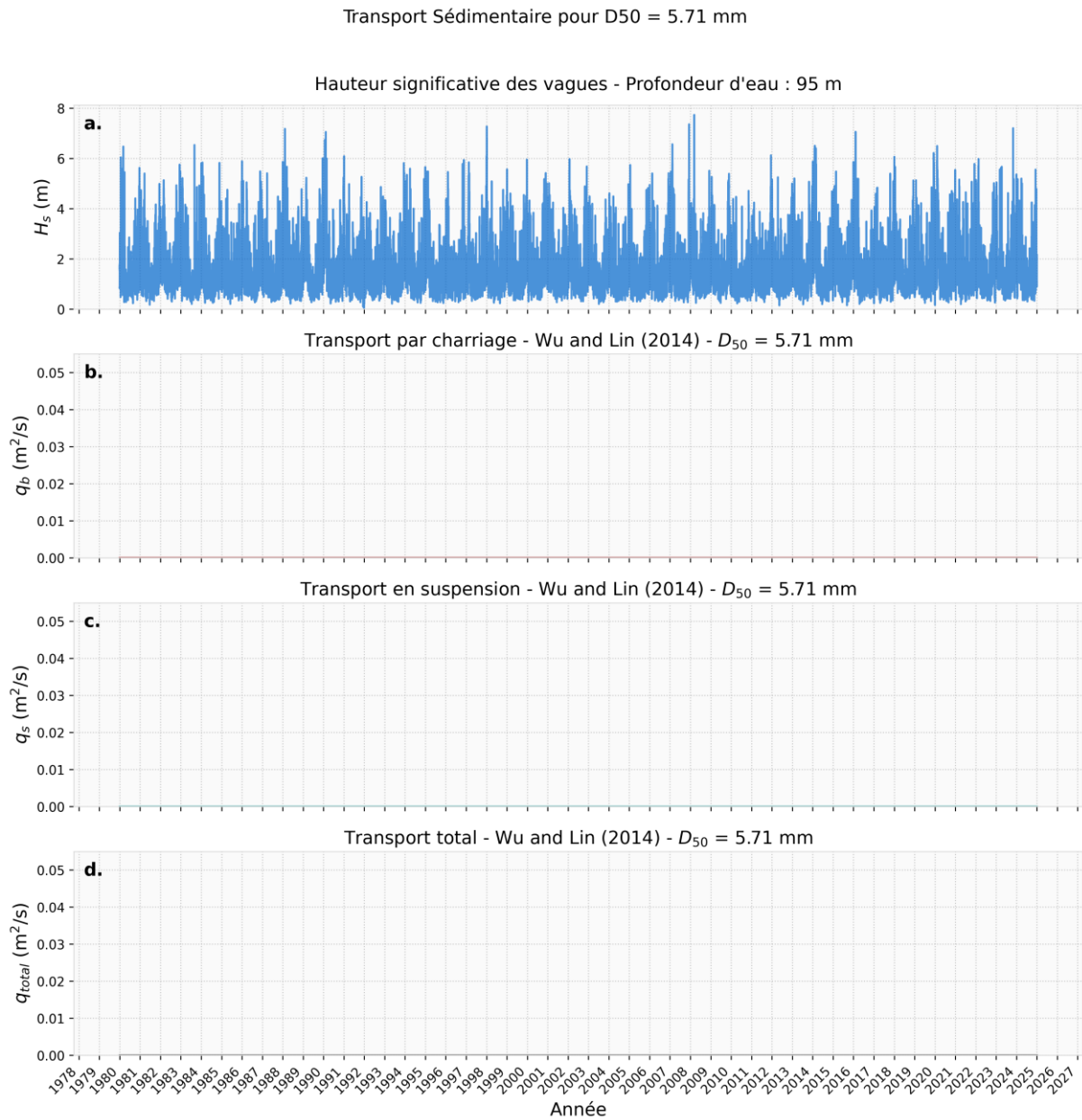


Figure 89. Séries temporelles de 1980 à 2024 pour $D_{50} = 5.71$ mm au Point P3. a. Hauteur significative des vagues (H_s), b. Transport par charriage (q_b), c. Transport en suspension (q_s), d. Transport total (q_{total}).